



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Química

TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA MEDIANTE EL USO DE UNA MEMBRANA CERÁMICA



Autor:	Daniel León de la Cruz
Director:	Oriol Gibert Agulló
Co-director:	Julio López Rodríguez
Convocatoria:	Enero 2018

Resum

En aquest Treball de Fi de Grau (TFG) s'ha estudiat la capacitat d'eliminació de les espècies iòniques presents en les aigües àcides de mina (AAM), fent servir una membrana de Nanofiltració (NF) ceràmica. Per la realització d'aquest estudi va ser necessari la presència d'una part teòrica on s'introdueix una explicació general sobre les membranes de NF i els seus mecanismes d'eliminació, com la realització d'una part experimental, a partir de la qual s'ha extret resultats que han donat lloc a una sèrie de conclusions sobre la capacitat rebuig de la membrana.

La part experimental es va realitzar en una planta a escala de laboratori, basat en un mòdul de membrana tubular amb circulació transversal i recirculació del permeat i del concentrat al tanc on es troba l'alimentació. En aquesta planta s'ha realitzat diversos experiments a partir de dues dissolucions diferents que simulaven les AAM. En la primera dissolució es va preparar 25L de Na_2SO_4 a 0,01M, amb la que es va estudiar el rebuig de les següents espècies iòniques: SO_4^{2-} , Na^+ i H^+ . En la segona dissolució també es va preparar 25L de Na_2SO_4 a 0,01M, però aquest cop en la dissolució n'hi havia una quantitat d'espècies metàl·liques. Amb aquesta nova dissolució es va estudiar el rebuig de les següents espècies iòniques: SO_4^{2-} , Na^+ , H^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} i Zn^{2+} .

La planta ha estat operant a una temperatura constant i amb un rang de pressió de treball que variava entre 6-13 bar. Les mostres, tant de la alimentació como del permeat, van ser analitzades per conductimetria, pH-metria, cromatografia iònica i absorció atòmica amb l'objectiu de determinar les concentracions de les espècies químiques d'estudi.

Els resultats experimentals obtinguts per els diferents mètodes d'anàlisi es van tractar mitjançant el *Solution-Diffusion-Film Model* (SDFM). Utilitzant l'eina de càlcul Excel es van representar els valors experimentals del rebuig i de les simulacions obtingudes pel SDFM, però també es van calcular les permeabilitats de la membrana dels diferents ions d'estudi. Els resultats obtinguts en la primera dissolució mostrava que gràficament els valors experimentals s'ajustaven a la representació gràfica del SDFM en tots els pH de treball. També mostrava que a $\text{pH} < 4,3$ el rebuig de Na_2SO_4 no superava el 30% i que quan s'apropava a pH 1 aquest rebuig decreixia. En canvi, a $\text{pH} > 6,3$ s'observa un rebuig superior al 75%, valor que augmentava cada cop que s'apropava a pH 14. Els valors obtinguts de la segona modelització ensenyaven que gràficament els valors experimentals s'ajustaven a la representació gràfica del SDFM en tots el pH de treball. També mostrava que a pH 2,8 el rebuig de la sal de Na_2SO_4 no superava el 30%, però el rebuig dels ions metàl·lics es mantenien sobre el 40%, sent clarament superiors al de la sal, però quan el pH s'apropava al valor d'1 tots els rebuigs disminuïen. Respecte la permeabilitat de la membrana de les diferents espècies iòniques, es van observar irregularitats en tots casos. Es van obtenir valors de permeabilitats exageradament altes o que en

totes dues dissolucions els resultats de les permeabilitats no concordaven amb la representació gràfica del SDFM. Aquests fets va suposar que no es no es valides el model SDFM per la membrana ceràmica d'estudi.

Un cop modelitzat tot els casos es va disposar a comparar els resultats del treball amb els resultats de treballs d'anys passats que utilitzaven membranes polimèriques. La comparació respecte els resultats de la primera dissolució mostrava que els rebuigs obtinguts per les membranes polimèriques eren superiors a la membrana ceràmica. Utilitzar una membrana polimèrica proporcionava un rebuig del 70% en medis àcids, cosa que en la membrana ceràmica es va obtenir quan es treballava en medis de pHs alcalins. La comparació respecte els resultats de la segona dissolució mostrava que els rebuigs obtinguts per les membranes polimèriques eren superiors a la membrana ceràmica. Utilitzar una membrana polimèrica per reduir la presència de la sal de Na_2SO_4 i de les espècies metàl·liques era efectiva proporcionava un rebuig del 70% de la sal i un rebuig del 80% de les espècies metàl·liques. En tots els casos d'estudi s'observava que gràficament el model SDFM s'ajustava perfectament als rebutjos experimentals i que els valors de la permeabilitat concordaven amb la gràfica del SDFM.

Els resultats obtinguts demostraven que les membranes polimèriques treballaven amb major eficiència que la membrana ceràmica d'estudi. Per la qual cosa, es va concloure que en el tractament de les AAM la utilització de la membrana ceràmica hauria de ser conjuntament amb les membranes polimèriques, es a dir, utilitzar primerament la membrana ceràmica per eliminar l'àcida de les AAM, i posteriorment utilitzar les membranes polimèriques. Utilitzant aquest mètode es podria reduir la degradació dels polímers causats per l'àcides de les aigües.

Resumen

En este Trabajo de Final de Grado (TFG) se ha estudiado la capacidad de eliminación de las especies iónicas presentes en las aguas ácidas de mina (AAM), mediante el uso de una membrana de Nanofiltración (NF) cerámica. Para la realización del estudio ha sido necesario la presencia de una parte teórica donde encontrar una explicación general sobre las membranas de NF y sus mecanismos de eliminación, así como la realización de una parte experimental, a partir de la cual se han extraído resultados que se han analizado para así adquirir una serie de conclusiones sobre la capacidad de rechazo de la membrana.

La parte experimental se ha realizado en una planta a escala laboratorio basada en un módulo de membrana tubular con circulación transversal y recirculación del permeado y del concentrado al tanque donde se encuentra la alimentación. En esta planta se han realizado diversos experimentos a partir de dos disoluciones diferentes que pretendían simular las AAM. En la primera disolución se preparó 25L de Na_2SO_4 a 0,01M, con la que se pretendió estudiar el rechazo de las siguientes especies iónicas: SO_4^{2-} , Na^+ y H^+ . En la segunda disolución también se preparó 25L de Na_2SO_4 a 0,01M, pero esta vez la disolución también contenía una cantidad de especies metálicas. Con esta nueva disolución se pretendió estudiar el rechazo de las siguientes especies iónicas: SO_4^{2-} , Na^+ , H^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} .

La planta ha estado operando a temperatura constante y con un rango de presión de trabajo que variaba entre 6-13 bar. Las muestras, tanto de la alimentación como del permeado, fueron analizadas por conductimetría, pH-metría, cromatografía iónica y absorción atómica con los que se determinó la concentración de las especies de estudio.

Los resultados experimentales obtenidos por los diferentes métodos de análisis se trataron mediante el *Solution-Diffusion-Film Model* (SDFM). Utilizando la herramienta de cálculo Excel se graficaron los valores experimentales del rechazo y las simulaciones obtenidas mediante el SDFM, y se calcularon la permeabilidad de la membrana de los diferentes iones de estudio. Los resultados obtenidos en la modelización de la primera disolución mostraban que gráficamente los valores experimentales del rechazo se ajustaban a la representación gráfica del SDFM en todos los pH de trabajo. También mostraban que a un $\text{pH} < 4,3$ el rechazo de Na_2SO_4 no superaba el 30% y que a medida que el pH se acercaba a 1 este rechazo disminuía. El motivo se debía a la presencia de una carga eléctrica positiva en la superficie de la membrana cerámica que atraía a la mayoría de las especies iónicas con carga eléctrica negativa (mayoritariamente HSO_4^-). En cambio, para $\text{pH} > 6,3$ se observa un rechazo superior al 75%, valor que iba en aumento a medida que se acercaba a un pH de 14, debido a la presencia de una carga eléctrica negativa en la superficie de la membrana cerámica que repelía a la mayoría de las

especies iónicas con carga eléctrica negativa (mayoritariamente SO_4^{2-}). Los resultados obtenidos en la modelización de la segunda disolución mostraban que gráficamente los valores experimentales del rechazo se ajustaban a la representación gráfica del SDFM en todos los pH de trabajo. También mostraba que a pH 2,8 el rechazo de la sal de Na_2SO_4 no superaba el 30%, mientras que el rechazo de los iones metálicos rondaba sobre el 40%, siendo claramente superiores al de la sal, y que a medida que el pH se acerca al valor de 1 todos los rechazos disminuían. Respecto a la permeabilidad de la membrana de las diferentes especies químicas, se observaron diferentes irregularidades como la obtención de valores de permeabilidad exageradamente altas o que en ambas disoluciones de estudio los resultados de las permeabilidades no concordaran con los resultados obtenidos al graficar el SDFM. Estos hechos provocaron que no se pudiera validar el modelo SDFM para la membrana cerámica del estudio.

Una vez modelados todos los casos se dispuso a comparar los resultados de este trabajo con los resultados de proyectos de años pasados que usaban membranas poliméricas. La comparación de los resultados procedentes de la primera disolución mostraba que los rechazos obtenidos por las membranas poliméricas eran superiores al de la membrana cerámica. Usar una membrana polimérica proporcionaba un rechazo de la sal que ronda el 70% en medios ácidos, valor que únicamente era obtenido cuando la membrana cerámica trabajaba a pH alcalinos. La comparación de los resultados procedentes de la segunda disolución también mostraba rechazos superiores en las membranas poliméricas. Utilizar una membrana polimérica para reducir la presencia de la sal de Na_2SO_4 y de las especies metálicas era efectiva, dado que con ella se obtenía un rechazo del 70% de la sal y un rechazo superior al 80% en las especies metálicas. En todos los casos de estudio procedentes de los proyectos con membranas poliméricas se ha observado que gráficamente el modelo SDFM se ajusta perfectamente a los datos experimentales del rechazo, y los valores de las permeabilidades concuerdan con la representación gráfica del SDFM.

Los resultados obtenidos demostraban que las membranas poliméricas trabajaban con mayor eficiencia que la membrana cerámica del estudio. Por lo que se concluyó, que en el tratamiento de las AAM la utilización de la membrana cerámica debía ser conjuntamente a las membranas poliméricas, es decir, usar primeramente la membrana cerámica como pretratamiento a las AAM para eliminar su acidez, y posteriormente utilizar las membranas poliméricas. Utilizando este método se podría reducir la degradación de los polímeros causado por la acidez de las aguas.

Abstract

In this End-of-Degree Project (TFG) I have studied the ability to eliminate the ionic species present in acid mine waters (AAM), using a Nanofiltration (NF) ceramic membrane. For the realization of this study was necessary a theoretical part where was introduced an explanation of the membranes of NF and its elimination mechanisms, such as the realization of an experimental part, where I was able to get results that after were transformed in a series of conclusions about the membrane rejection capacity.

The experimental part was performed at a laboratory-scale plant, based on a tubular membrane module with transverse circulation and recirculation of the permeate and the concentrate in the tank where the feeding was located. In this plant several experiments have been carried out from two different dissolutions that simulated AAM. In the first dissolution 25L of Na_2SO_4 was prepared at 0,01M, where the rejection of the following ionic species was studied: SO_4^{2-} , Na^+ and H^+ . In the second dissolution 25L of Na_2SO_4 was prepared at 0,01M, but in this case the dissolution there was an amount of metallic species. With this new solution the rejection of the following ionic species was studied: SO_4^{2-} , Na^+ , H^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} .

The plant were been operating at a constant temperature and with a range of work pressure ranging from 6-13 bar. . The samples were collected from the feeding and the permeate. After that it was analyzed by conductimetry, pH-metrics, ion chromatography and atomic absorption with the aim of determining the concentrations of the chemical species of study.

The experimental results obtained by the different methods of analysis were treated using the Solution-Diffusion-Film Model (SDFM). Using the Excel tool, the experimental values of the rejection and the simulations obtained by the SDFM were represented, and the permeability of the membrane was calculated.

The results obtained in the first dissolution showed that graphically the experimental values were adjusted to the graphical representation of the SDFM in all range of pH. Also it showed that at a pH <4,3 the rejection of Na_2SO_4 did not exceed 30% and that when the pH approached to 1 this rejection decreased. But, a pH > 6,3 a rejection of more than 75% was observed, value that was increasing when the number of pH was approaching to 14. The values obtained from the second modeling showed that the experimental values graphically adjusted to the graphical representation of the SDFM in all range pH. It also showed that at 2,8 pH the rejection of the Na_2SO_4 salt did not exceed 30%, but the rejection of metal ions remained at 40%, but when the pH was approaching to the value of 1 all rejection decreased. Regarding the permeability of the membrane of the different ionic

species, irregularities were observed in all cases. Excessively high permeability values would be obtained or that in both dissolutions the permeability results did not coincide with the graphical representation of the SDFM. These facts supposed that the SDFM model is not valid for the ceramic study membrane.

When all the cases were modeled, it was the moment to compare the results of the work with the results of previous years' work using polymeric membranes. The comparison with the results of the first dissolution showed that the rejections obtained by the polymeric membranes were superior to the ceramic membrane. Using a polymer membrane provided a 70% rejection in acid mediums, which in the ceramic membrane would be obtained when working in alkaline pH environments. The comparison with the results of the second dissolution showed that the reductions obtained by the polymeric membranes were superior to the ceramic membrane. Using a polymer membrane to reduce the presence of the Na_2SO_4 salt and the metal species was effective provided a 70% rejection of salt and a rejection of 80% of the metal species. In all cases of study it was observed that graphically the SDFM model adjusted perfectly to the experimental rejections and that the permeability values were coincided with the SDFM graph.

The results obtained showed that polymeric membranes worked more efficiently than the ceramic membrane that was studied in this essay. Therefore, it was concluded that in the treatment of AAM the use of the ceramic membrane should be in conjunction with the polymeric membranes. This could be executed by using first the ceramic membrane, to eliminate the acidity of the AAM, and then by using the polymeric membranes. Using this method could reduce the degradation of polymers caused by acids in the water.

Agradecimientos

Querría agradecer a mi Tutor, el Dr. Oriol Gibert Agulló, por darme la oportunidad de poder realizar este proyecto y guiarme a lo largo del camino. Mencionar la gran ayuda proporcionada por Julio López, que día a día resolvía mis dudas tanto cuando realizaba la parte experimental en el laboratorio de la universidad como cuando estaba realizando la modelización de los experimentos.

Agradecer a mi familia y mis amigos por soportarme y ofrecerme ese gran apoyo que me ha permitido poder acabar el grado en Ingeniería Química y realizar este Proyecto de Final de Grado.



Abreviaciones

AAM: aguas ácidas de mina

CVD: Deposición química de vapor

cm: Centímetro; $1\text{cm}=10^{-2}\text{ m}$

Da: Dalton; $1\text{Da} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$

EDL: Doble capa eléctrica

IEP: Punto isoeléctrico

IVA: Impuesto sobre el valor añadido

M: Molaridad (mol/L)

MF: Microfiltración

mS: MilíSiemens; $1\text{mS}=10^{-3}\text{ S}$

NF: Nanofiltración

nm: Nanómetro; $1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$

RO: Ósmosis inversa

ppm: Partes por millón (mg/L)

SDFM: Solution-Diffusion-Film Model

TMP: Presión de transmembrana

UF: Ultrafiltración

μm : Micrómetro; $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{ m}$

μS : MicróSiemens; $1\mu\text{S}=10^{-6}\text{ S}$

Abreviaciones de las especies químicas

Al: Aluminio

As: Arsénico

Cd: Cadmio

Cu: Cobre

Cu^{2+} : Ión de cobre

CuFeS_2 : Calcopirita

CH_3SO_3 : Ácido metasulfónico

Fe: Hierro

Fe^{2+} o Fe(II): Ión ferroso

Fe^{3+} o Fe(III): Ión férrico

H_2SO_4 : Ácido sulfúrico

HSO_4^- : Ión hidrógeno sulfato

Mn: Magnesio

Na_2CO_3 : Carbonato sodio

NaHCO_3 : Bicarbonato sódico

Na^+ : Ión de sodio

O_2 : Oxígeno

PAN: Poliacrilonitrilo

Pb: Plomo

PES: Polietersulfones

FeAsS: Arsenopirita

PVC: Policloruro de vinilo

Fe(OH)₃: Hidróxido de hierro(III)

S: Azufre

FeS₂: Pirita de hierro o marcasita

SO₄²⁻: Ión de sulfato

H⁺: Protones

Zn: Zinc

H₂O: Agua

Zn²⁺ : Ión de zinc

Índice

RESUM	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
AGRADECIMIENTOS	VII
ABREVIACIONES	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos del proyecto.....	1
1.2. Alcance del proyecto	1
2. AGUAS ÁCIDAS DE MINA	3
2.1. Tratamientos de las aguas ácidas de mina.....	4
3. TECNOLOGÍA DE MEMBRANA	7
3.1. Operaciones de separación de las membranas	7
3.2. Materiales de fabricación de las membranas	8
3.3. Morfología de las membranas.....	9
3.4. Tipos de módulos de membranas	11
3.5. Operaciones de las membranas	11
3.6. Mecanismos de transporte.....	13
3.6.1. Modelo poro-flujo.....	13
3.6.2. Modelo solución-difusión.....	14
3.7. Fenómenos de transporte.....	16
3.7.1. Polarización por concentración.....	16
3.7.2. Exclusión de Donnan	17
3.7.3. Exclusión dieléctrica	18
3.7.4. Doble capa eléctrica.....	19
4. NANOFILTRACIÓN	23
4.1. Historia de la Nanofiltración.....	23
4.2. Membranas cerámicas	24
4.2.1. Tipos de membranas cerámicas.....	25
4.3. Membranas cerámicas vs membranas poliméricas.....	27
4.4. Ensuciamiento y limpieza de las membranas cerámicas.....	29

4.5.	Factores que influyen en el proceso de filtración de las membranas cerámicas de Nanofiltración.....	31
4.5.1.	Variación de la concentración	32
4.5.2.	Efecto del pH.....	33
5.	SOLUTION-DIFFUSION-FILM MODEL (SDFM)	35
6.	MÉTODO EXPERIMENTAL	40
6.1.	Planta de laboratorio	40
6.2.	Procedimiento experimental	42
6.3.	Diseño experimental	47
6.4.	Análisis de las muestras	49
6.4.1.	Cromatografía iónica	49
6.4.2.	Espectrofotometría de absorción atómica en llama.....	50
6.4.3.	pH-metro.....	51
6.4.4.	Conductímetro.....	52
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y MODELIZACIÓN DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	53
7.1.	Rechazo de 0,01 M de Na_2SO_4 a distintos pHs	53
7.2.	Rechazo de iones en disoluciones de Na_2SO_4 con iones metálicos	63
7.3.	Comparación de resultados de membranas cerámicas con membranas poliméricas	68
7.3.1.	Comparación de los rechazos de Na_2SO_4	68
7.3.2.	Comparación de los resultados de disoluciones de Na_2SO_4 con iones metálicos	72
8.	IMPACTO AMBIENTAL.....	76
	CONCLUSIONES	79
	ANÁLISIS ECONÓMICO	81
	BIBLIOGRAFÍA	87
	ANEXOS	90
	Anexo A: Descripción de membranas poliméricas.....	90
	Anexo B: Gráficas de rechazo obtenidas por conductimetría a cada presión de trabajo	92
	Anexo C: Fichas de seguridad de los reactivos utilizados en el proyecto	95

1. Introducción

1.1. Objetivos del proyecto

Las aguas ácidas de mina (AAM) representa un gran problema medio ambiental ocasionado tanto por las altas concentraciones de metales pesados, como por su elevada acidez y sus altas concentraciones de sulfato. El objetivo principal de este proyecto será el estudiar la eliminación de las especies químicas presentes en AAM mediante el uso de una membrana cerámica de Nanofiltración(NF), con la finalidad de conseguir una corriente que permita obtener una cantidad reducida de sulfato y metales. Como objetivos secundarios se intentará predecir el comportamiento del rechazo de las especies iónicas en la membrana mediante la aplicación de un modelo matemático.

1.2. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto se puede dividir en tres grandes bloques. Con el primer bloque se introducirán los motivos de formación de las AAM, así como los problemas que genera el drenaje ácido de minas. También se pretenderá explicar la tecnología de membranas usada en los tratamientos de aguas, y posteriormente se hará un especial énfasis en las membranas cerámicas de NF.

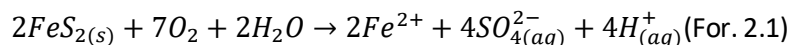
El segundo bloque está dedicado a la descripción de la metodología experimental que se usará en el proyecto. Se trabajará con una planta de NF a escala de laboratorio, utilizando un módulo de membrana tubular, por donde pasará una disolución que pretenderá simular a las AAM.

Por último, el tercer bloque se basará en la realización de los cálculos y análisis necesarios para la obtención de los rechazos de las especies de interés. Los resultados obtenidos serán estudiados y con ellos se obtendrán las conclusiones pertinentes de este proyecto.

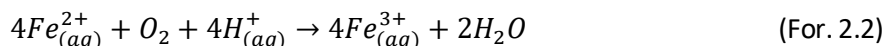
2. Aguas ácidas de mina

Las aguas ácidas de mina (AAM) o drenaje ácido de minas son el resultado de un proceso universal biogeoquímico que ha estado presente en la Tierra desde hace varios siglos. Este proceso ha ocasionado que se generen varios problemas de contaminación medioambiental por la aparición de aguas ácidas ricas en ácido sulfúrico y en metales tóxicos. Este drenaje químico ocurre en minas ricas en minerales sulfúricos (pirita, calcopirita). Normalmente su formación es producida por la interacción de agentes oxidantes (generalmente el oxígeno presente en el aire) que reaccionan con los sulfuros metálicos [Jacobs et al., 2013].

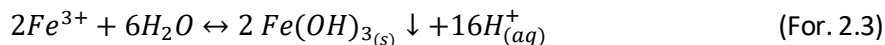
La pirita de hierro (FeS_2) o como comúnmente se conoce como el "oro de los tontos" es un mineral de sulfuro de hierro que origina la aparición de las aguas ácidas de minas, pero también la marcasita (FeS_2), la arsenopirita (FeAsS) y la calcopirita (CuFeS_2) [Jacobs et al., 2013]. Frecuentemente estos minerales presentes en las minas, son estables e insolubles en las aguas siempre y cuando no estén expuestos al aire. Sin embargo, debido a la actividad humana, como la extracción de minerales o la erosión debido a procesos naturales, una parte de estos minerales sulfúricos entran en contacto con el oxígeno del aire, provocando su oxidación, de tal manera que se obtienen iones de sulfato (SO_4^{2-}), iones ferrosos (Fe^{2+} o Fe(II)) y protones (H^+) [Jacobs et al., 2013]:



Posteriormente a esta reacción, se produce una nueva reacción de oxidación del ión ferroso, que en contacto con el oxígeno se oxida a ión férrico (Fe^{3+} o Fe(III)) [Jacobs et al., 2013].

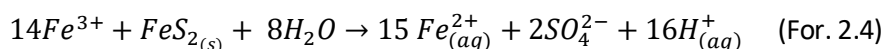


La formación de protones originados en la primera reacción provoca una disminución del pH en el agua. Si el pH del agua disminuye lo suficiente y llega a adquirir un valor que está comprendido entre 3,5 -2,3, se puede producir una reacción disolución-precipitación reversible, donde el ión férrico que es solo soluble en medios ácidos, se disuelve en el agua ácida y precipita para formar hidróxido de hierro(III) [Fe(OH)_3] [Simate et al., 2014].



La generación de más protones procedentes de la tercera reacción origina una nueva disminución del pH en el agua aumentando la acidez en ella. Cuando su valor alcanza niveles inferiores a 2, el hidróxido de hierro(III) se vuelve inestable provocando que la reacción se desplace hacia los

reactivos, y en consecuencia, el hierro férrico puede reaccionar con la pirita generando la siguiente reacción[Simate et al., 2014]:



Con pH inferiores a 4,5, el Fe(III) tiende a oxidar mucho más rápido la pirita que el O_2 , e incluso puede ser aún más rápido que el O_2 oxide el Fe(II), es por eso que cuando se origina la cuarta reacción, también se produce un exceso de H^+ , que conlleva a una mayor disminución del pH con valores de 1 o incluso superarlo[Jacobs et al., 2013].

Durante las reacciones que se producen en el fenómeno del drenaje de aguas de minas, suele ser común que alguna de las reacciones sea catalizada por la presencia de algún microorganismo. Microorganismos como el *Thiobacillus ferroxidans* o el *Leptospirillum ferroxidans* pueden estar presentes, provocando que intervengan en el proceso de oxidación del Fe(II) de la segunda reacción, consiguiendo un aumento en el factor de aceleración del 10^6 [Jacobs et al., 2013].

En resumen, las AAM desencadenan un gran problema medioambiental. Tal y como se ha ido comentando, este fenómeno provoca la generación de un entorno altamente ácido (pH ~1), con una gran concentración de ácido sulfúrico presente en el agua y acompañada de un precipitado ($Fe(OH)_3$) que colorea el agua y los cursos del agua con un tono anaranjado-marrón. A todo esto hay que añadirle que también puede haber una contaminación en el agua producida por la presencia de metales pesados. El exceso de acidez en el entorno promueve la disolución de los metales presentes en los suelos y en las rocas. Es por eso, que estas aguas suelen estar enriquecidas con Fe, Mn, Al, Cu, Zn, Cd, Pb y As [Jacobs et al., 2013].

2.1. Tratamientos de las aguas ácidas de mina

El tratamiento de aguas para elevados niveles de metales y de acidez es un proceso común de los fenómenos de drenaje ácido de minas. La efectividad y fiabilidad del tratamiento del agua es altamente variable, dependiendo del método utilizado para el tratamiento. Los mecanismos usados para el tratamiento de las aguas procedentes de estas minas se pueden clasificar en sistemas pasivos o en sistemas activos.

Los sistemas de tratamientos de aguas pasivos se caracterizan por ser operaciones donde no es necesario el uso de aditivos químicos ni la incorporación de alguna asistencia mecanizada o motorizada. Los tratamientos pasivos son muchos más eficaces con pequeños caudales como los que se encuentran en minas abandonadas o en humedales. De todos los tratamientos pasivos existentes los 6 siguientes son los más usados: los sistemas de humedales aeróbicos y anaeróbicos, drenaje

anóxico de caliza, humedales de flujo vertical, el canal abierto de caliza y el lecho filtrante de caliza [Jacobs et al., 2013]. En contraste a esta vía se encuentran los sistemas de tratamientos de aguas activos, donde el uso de equipos motorizados junto a aditivos químicos es altamente usado para que las AAM alcancen los niveles específicos estándar de calidad requeridos. Ejemplos de sistemas activos serían aquéllos basados en la adición de sustancias alcalinas como la cal, sosa cáustica, amoníaco o carbonato sódico, con el fin de conseguir una neutralización del ácido, de tal forma conseguir llegar a valores de pH que permitan la precipitación de los metales, o los basados en procesos de filtración mediante la aplicación de presión como el de NF objeto de estudio en este TFG. Los sistemas activos generalmente suelen ser tratados en plantas especializadas en el tratamiento de aguas [Jacobs et al., 2013].

Actualmente estos sistemas están siendo operativos en varias regiones del mundo. Algunos de los sistemas activos son operativos en lugares como la mina de Berkeley, Butte Montana; en las playas de Britania, Columbia Británica; en la mina Montaña de hierro, ciudad de Shasta, California; etc, mientras que los sistemas pasivos son más frecuentes en regiones donde la minería fue abandonada [Jacobs et al., 2013].

3. Tecnología de membrana

Entre los procesos industriales de separación, los que se basan en membranas son considerados como un campo nuevo y prometedor. Sin embargo, si se consideran la cantidad de procesos industriales que utilizan una membrana para realizar una separación se llegaría a la conclusión que la ciencia y la tecnología de membrana están plenamente consolidadas.

Una membrana es una barrera semipermeable que permite el paso de uno o varios componentes de una mezcla inicial. Normalmente, los procesos de separación con el uso de una membrana están relacionados con el proceso de filtración. La filtración es el proceso que consiste en hacer pasar un fluido a través de un medio, denominado filtrante, con el fin de separar la materia que se encuentra disuelta o en suspensión en el seno del fluido. Aunque el químico Thomas Graham usó una pequeña membrana para desarrollar la ley de difusión en 1848, y que las primeras membranas no se sintetizaron al cabo de un siglo después, el pleno desarrollo e implementación de las membranas no se consideraron una gran aportación a la causa científica hasta mediados del siglo XX. El factor clave en la utilización de una membrana es la selectividad, ya que es el carácter que define el proceso de la membrana y su aplicación en los procesos industriales [Schäfer, et al, 2005].

Hoy en día las membranas, aun habiendo tenido unos inicios muy modestos que le permitieron dejar huella, se han abierto paso en el mercado volviéndose muy atractivas. Tan atractivas que muchos procesos convencionales de separación como la destilación, la adsorción, la absorción, la extracción y la cristalización, se han adaptado de manera favorable al uso de membranas.

En los diferentes puntos de este apartado que se tratarán a continuación se quiere exponer los diversos aspectos a considerar siempre que se trabaje con una membrana.

3.1. Operaciones de separación de las membranas

El método usado para la eliminación de solutos durante los procesos de filtración definirá la operación de separación. Existen dos métodos de operación conocidos como filtración directa y filtración tangencial.

La filtración directa (*dead-end*), es aquel proceso de filtración donde toda la solución del flujo de entrada penetra perpendicularmente a la superficie de entrada, habiendo únicamente un canal de entrada (alimentación) y un canal de salida (permeado). En consecuencia, los solutos procedentes de la alimentación son retenidos y acumulados a lo largo de la superficie de la membrana de filtración, este tipo de operación se puede observar en la Figura 1. La filtración directa principalmente ha sido

usada en los procesos en los que intervenía las membranas de microfiltración para la clarificación y esterilización, donde el flujo es relativamente limpio y con pequeñas aplicaciones de volumen. En el resto de aplicaciones, la acumulación de las partículas a eliminar en la membrana es tan severa que la práctica de este método se vuelve inviable [Singh et al, 2016].

La filtración tangencial(*cross-flow*) es aquella en la que el flujo de entrada (alimentación) es introducido de manera tangencial a la superficie de la membrana, dando lugar a dos corrientes de salida: un flujo de salida permanente que lleva todos los solutos que no son capaces de atravesar la membrana (concentrado) y otro flujo de salida que lleva todos los solutos que sí han atravesado la membrana (permeado), este tipo de operación es mostrada en la Figura 1. Para la realización de este filtrado, la alimentación ha de fluir tangencialmente sobre la superficie de la membrana y el flujo del permeado atravesar la membrana con dirección tangencial. La entrada perpendicular de la alimentación asociado a una velocidad tangencial constante permite desechar las partículas o macromoléculas que se puedan acumular en la superficie de la membrana por la aplicación de fuerzas de cizalla. En definitiva, provoca que la capa de sólidos acumulados en la membrana se vea reducida. La filtración tangencial principalmente ha sido usada en los procesos de Ósmosis Inversa, Nanofiltración, Ultrafiltración, y en algunos procesos puntuales de Microfiltración [Singh et al, 2016].

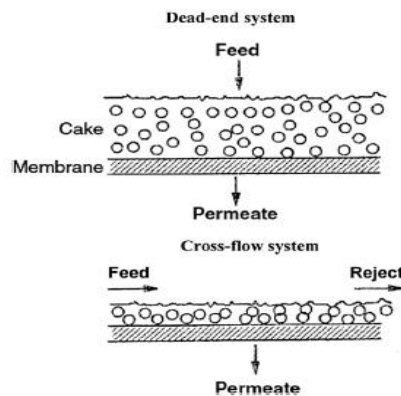


Figura 1. Imagen de una filtración directa y una filtración tangencial [Fuente: Singh et al, 2016]

3.2. Materiales de fabricación de las membranas

Las membranas pueden estar constituidas por un variado número de materiales. La elección de estos materiales estará basada en los requerimientos que se requieran en el proceso, las propiedades térmicas y químicas deseadas, y tendencia a la incrustación. Las membranas se pueden clasificar en tres grupos en función del material usado para su construcción:

-**Membranas orgánicas:** Fabricadas principalmente por polímeros, fueron el primer tipo de material que se usaron en la fabricación de membranas (celulosa y derivados). Presentan una limitada resistencia química y térmica [Singh et al, 2016].

- **Membranas inorgánicas:** Las membranas inorgánicas se han convertido en una alternativa viable al uso de membranas poliméricas. Estas membranas que suelen estar fabricadas a partir de materiales metálicos o cerámicos, ofrecen una mayor estabilidad térmica y una gran resistencia a ataques químicos. Sin embargo, esta alternativa es mucho más cara que las membranas poliméricas. Las membranas cerámicas suelen ser un tipo especial de membranas microporosas, usadas principalmente cuando son requeridas una resistencia y estabilidad térmica [Singh et al, 2016].

3.3. Morfología de las membranas

Las membranas también se pueden separar en función de su morfología interna, es decir, dependiendo de la estructura interna debido a la forma de sus poros. Esta característica permite diferenciar dos tipos de membranas:

- **Membranas isotrópicas:** Membranas con poros cilíndricos que destacan por tener una estructura simétrica entre ellos, que van de un lado a otro de la membrana con el mismo ancho [Gitis et al, 2016].

-**Membranas anisotrópicas:** Membranas con poros similares a esponjas que destacan por tener una estructura asimétrica entre ellos [Gitis et al, 2016].

La Figura 2 muestra visualmente las diferencias entre las membranas isotrópicas y anisotrópicas provocadas por la presencia de simetría o no a lo largo de un poro.

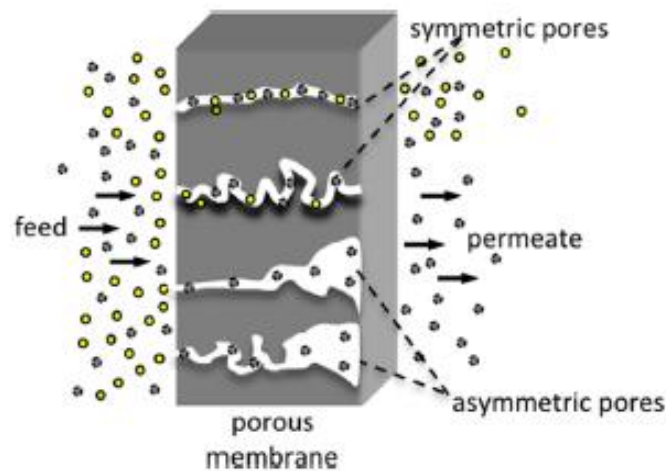


Figura 2. Membrana con poros asimétricos y simétricos[Fuente: Gitis, et al, 2016]

Pero otro rasgo de la morfología en las membranas sería el tamaño que presenta sus poros. Esta característica nos permite diferenciar también dos tipos de membranas:

- **Membranas porosas:** Estas membranas son funcional y estructuralmente similares a un filtro convencional. Tienen una capa rígida con una distribución aleatoria, que destacan por la presencia de poros en ella. Sin embargo, difieren de los filtros por lo extremadamente pequeños que pueden llegar a ser sus poros. Debido al tamaño de los poros las partículas que sean más grandes que éstos son rechazados, en cambio las partículas que sean mucho más pequeñas que el tamaño del poro podrán atravesar la membrana. Es por eso que la separación de los solutos mediante el uso de membranas porosas va en función del tamaño molecular y de la distribución del tamaño del poro. El tamaño de un poro está subdividido entre macroporos (diámetro >50nm), mesoporos (2-50nm) y microporos (<2nm) [Gitis et al, 2016].

- **Membranas densas (no porosas):** Consiste en una densa capa cuyos poros son mucho más pequeños que los descritos por las membranas microporosas, incluso se puede considerar la inexistencia de poros en este tipo de membranas. La obtención del permeado únicamente podrá lograrse mediante el efecto de difusión utilizando una fuerza impulsora como la presión, la concentración o la diferencia eléctrica (fuerzas impulsoras que también pueden utilizarse cuando se trabajan con membranas porosas). La separación de varios componentes de una mezcla es directamente proporcional a la velocidad de transporte dentro de la membrana, que es determinado a través de la difusividad y solubilidad en el material de la membrana [Gitis et al, 2016].

3.4. Tipos de módulos de membranas

Se denomina módulo de membrana a todo elemento en el que se dispone una membrana para su utilización industrial, formado únicamente por la propia membrana y su envoltorio o carcasa de protección. Durante el transcurso de los años se han diseñado diversos tipos de módulos, pero su diferenciación se encuentra básicamente por la disposición de la membrana:

-Membranas planas: Fueron el primer tipo de membranas que se fabricó y con el que se iniciaron las primeras aplicaciones de filtración. Están constituidas por unas láminas que se colocan dentro de un marco (circular o rectangular) que actúa como soporte de la membrana para así proporcionarle rigidez y resistencia. Suelen ser de superficies específicas pequeñas, por lo que para aumentar su producción se suele colocar unas encima de otras [Marti, et al., 2007].

-Membranas tubulares: Son tubos, cuya pared interna es una membrana semipermeable. Al igual que las membranas planas, son un elemento poco usado. Su uso específico ha sido siempre para líquidos con grumos o grandes partículas en su interior. Se usan para aplicaciones similares a las de las membranas planas. Son de difícil ensuciamiento y fácil limpieza [Marti, et al., 2007].

-Membrana en espiral: Este tipo de membrana está constituida por la unión de varios pares de membranas en lámina enrollados alrededor de un canal por donde circulará el permeado. Tres de los bordes de cada par de membranas están sellados entre sí, el cuarto borde se encuentra unido al canal del permeado. Cada par de láminas se encuentra separado por una tela separadora que permite el flujo del permeado hacia el canal. Una única membrana en espiral puede estar compuesta por 20 pares de láminas y cada par separado por una red llamada *feed spacer*. Las ventajas de estas membranas es que son muy compactas y de coste reducido, pero son de difícil limpieza y reparación [Marti, et al., 2007].

3.5. Operaciones de las membranas

Las operaciones de separación mediante el uso de membranas es un campo que abarca muchos procesos. Las operaciones que pueden realizar las membranas están divididas según el origen de la fuerza impulsora, de las fases de la alimentación y el permeado, y el tamaño de sus poros. Esta fuerza impulsora describe el origen de la fuerza necesaria para transmitir el fluido de la alimentación hasta el canal del permeado. Presión, diferencia de potencial o de concentración son algunas de las fuerzas impulsoras existentes. Las siguientes operaciones son las más utilizadas en la industria para el tratamiento de aguas:

-Microfiltración (MF): Filtración que se realiza dentro de una zona de porosidad comprendida entre 1 y 0,1 μm . Su uso se basa en la eliminación de partículas, coloides, bacterias, etc. El proceso de Microfiltración puede realizarse por filtración directa o tangencial [Marti, et al., 2007].

-Ultrafiltración(UF): Filtración que se realiza dentro de una zona de porosidad comprendida entre 0,1 y 0,001 μm . La Ultrafiltración puede realizarse por filtración directa o tangencial, se especializa en separar compuestos de carácter no iónico que se encuentren disueltos en el agua, generalmente suelen ser grandes moléculas orgánicas [Marti, et al., 2007].

-Nanofiltración (NF): Filtración que se realiza dentro de una zona de porosidad inferior a 0,001 μm . Esta filtración que se considera como la intermedia entre la Ultrafiltración y la Ósmosis Inversa, ya que, aunque no pueda conseguir una separación superior del 95% de iones como lo realiza la Ósmosis Inversa, separa gran cantidad de ellos, especialmente los polivalentes. Las membranas de NF pueden trabajar a presiones bajas permitiendo su uso en concretas aplicaciones para reducir el nivel salino, especialmente descalcificar con consumos energéticos bajos [Marti, et al., 2007].

-Ósmosis Inversa(RO): Filtración que se realiza dentro de una zona de porosidad inferior a 0,001 μm , incluso se puede considerar la no existencia de poros (membrana densa). Esta filtración por la que se obtiene una solución diluida a partir de una solución concentrada mediante el proceso de difusión, invirtiendo el proceso natural de Ósmosis [Marti, et al., 2007].

Tabla 1. Operaciones de separación por membrana en función de la fuerza impulsora[Fuente: Gitis et al., 2016]

Membrane process	Feed phase – permeate phase	Driving force	Size of retained compounds	Type of retained compounds
Microfiltration (MF)	L → L	ΔP	0.1–100 μm	Bacteria, fine solids
Ultrafiltration (UF)	L → L	ΔP	5 nm to 100 μm	Viruses, total suspended solids, natural organic matter
Nanofiltration (NF)	L → L	ΔP	1 nm to 100 μm	Inorganics, sugars, dyes, surfactants
Reverse osmosis (RO)	L → L	ΔP	0.1 nm to 100 μm	Salts, metal ions, minerals
Gas separation	G → G	ΔP	0.5 nm to 100 μm	Gases
Vapour permeation	G → G	ΔP	0.5 nm to 100 μm	Liquids
Pervaporation	L → G	ΔP	0.5 nm to 100 μm	Liquids
Electrodialysis	L → L	$\Delta \Phi$		Ions
Dialysis	L → L	ΔC		
Membrane distillation	L → L	ΔT		Liquids

Note: G and L stand for gas and liquid phases, respectively, ΔP is the pressure difference, $\Delta \Phi$ is the electrical potential difference, ΔC is the concentration difference and ΔT is the temperature difference.

La Tabla 1 muestra los diferentes tipos de operaciones de membrana teniendo en cuenta la fuerza impulsora que se ejerza, el tamaño de los componentes que se retienen y el tipo de componentes que son retenidos.

3.6. Mecanismos de transporte

La más importante propiedad que permite a las membranas ser el perfecto material usado en los procesos de filtración es su habilidad para controlar el ratio de permeabilidad de las diferentes especies, es decir, la capacidad para excluir o no las especies que serán llevadas con corriente del permeado, producidos por la continua transferencia de materia entre el fluido y la membrana. Los modelos usados para describir esta habilidad de exclusión son los conocidos mecanismos de transporte en membranas.

Existen dos modelos que expliquen los mecanismos de transportes de especies a través de las membranas: modelo poro-flujo y el modelo solución-difusión.

3.6.1. Modelo poro-flujo

En el modelo poro-flujo, la separación de especies se basa meramente por una cuestión física. Como ya sabemos en los procesos de filtración, el flujo de una disolución es obligado a pasar por una

membrana mediante el uso de una fuerza impulsora, para así obtener otro flujo denominado permeado, que tendrá una menor concentración de partículas (ya sean partículas disueltas como en suspensión). El mecanismo de exclusión de este modelo ocurre cuando ciertas partículas no son capaces de atravesar los poros de las membranas debido a la morfología de las especies o de los poros [Baker, 2004]. La Figura 3 muestra el funcionamiento de exclusión provocado por el modelo poro-flujo. La ecuación básica que describe este mecanismo es la conocida ley de Darcy:

$$J_i = K' c_i \frac{dp}{dx} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

J_i : Ratio de transferencia del componente o flujo ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

dp/dx : gradiente de presión existente en la medida del poro

c_i : La concentración del componente i

K' : coeficiente que refleja la naturaleza del medio

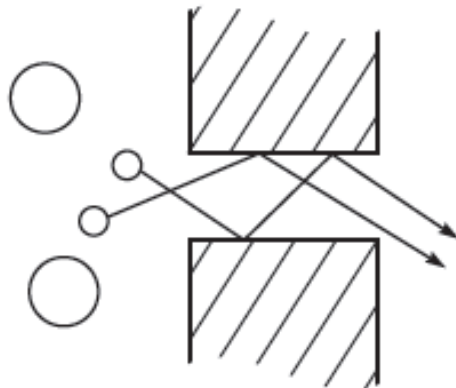


Figura 3. Exclusión de partículas por la medida[Fuente: Baker 2004]

3.6.2. Modelo solución-difusión

El modelo solución-difusión, al igual que el modelo poro-flujo, fue propuesto en el siglo XIX como un mecanismo de transporte de partículas, pero no fue hasta 1940 que este modelo fue usado para explicar el transporte de gases a través de membranas poliméricas [Baker, 2004].

En este modelo, ciertas partículas que se encuentran disueltas en la disolución al entrar en contacto con la membrana se disuelven con el material de ésta, y posteriormente experimentan un proceso de difusión, permitiendo su transporte por la membrana bajo un gradiente de concentración. El

desplazamiento promedio de una partícula puede calcularse desde su punto de partida hasta después de un periodo de tiempo, en cambio no se puede decir nada sobre la dirección en la que la partícula se moverá. Generalmente las partículas permeadas que se encuentran atravesando el medio de la membrana tienen un movimiento constante pero que es aleatorio entre ellas, en cambio, en los casos que nos encontramos en medios isotrópicos el movimiento de las partículas no tienen una dirección predefinida de movimiento. La Figura 4 muestra el funcionamiento de exclusión provocado por el modelo solución-difusión [Baker, 2004].

Por norma, el proceso de difusión es producido si un gradiente de las partículas del permeado es formado en el medio, y esto nos muestra que el transporte de materia ocurrirá desde regiones de altas de concentración a regiones bajas. Este concepto fue expuesto por Fick teóricamente y experimentalmente en 1855 [Baker, 2004]. Fick formuló sus resultados con una ecuación que actualmente se conoce como la ley de difusión de Fick:

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

J_i : Ratio de transferencia del componente o flujo ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

dc_i/dx : gradiente de concentración del componente i ($\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}$)

D_i : Coeficiente de difusión y es una medida de la movilidad de las partículas ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

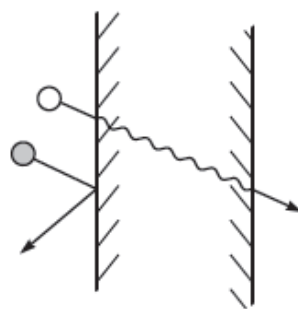


Figura 4. Difusión de una partícula por una membrana [Fuente: Baker 2004]

La Figura 5 muestra las membranas que debido a su tipo de poro realizan el mecanismo de poro-flujo o el mecanismo solución-difusión. Se puede apreciar la existencia de membranas como las de NF o las de UF donde se pueden realizar ambos mecanismos.

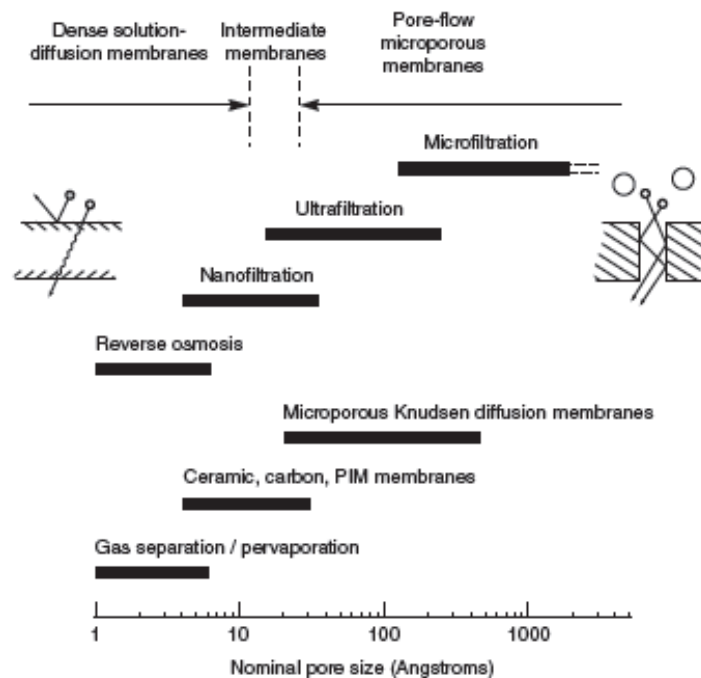


Figura 5. Mecanismo de transporte en función del tipo de membrana [Fuente: Baker, 2004]

3.7. Fenómenos de transporte

Los mecanismos de transporte presentados en el apartado anterior no abarcan todos los fenómenos que ocurren cuando las partículas de los solutos entran en contacto con las membranas de separación, debido a los procesos de transferencia de masa. La acumulación de solutos en la membrana o el rechazo de especies con la misma carga son algunos de los fenómenos producidos por el transporte de solutos.

A continuación, se hablarán de los fenómenos de transporte que afectan al correcto funcionamiento de las membranas.

3.7.1. Polarización por concentración

La polarización por concentración es un fenómeno que ocurre cuando los solutos presentes en la alimentación son retenidos, en mayor o menor grado, en la superficie de la membrana, produciendo un aumento de la concentración en las zonas cercanas a la capa superficial de la membrana. El rechazo de las partículas crea un perfil de concentración entre la superficie de la membrana y el resto de la disolución. La superficie creada es la que se conoce como capa de polarización o capa no agitada [Baker, 2004] [Gitis et al, 2016].

Debido a que los componentes de la mezcla penetran en la membrana a diferentes velocidades, el gradiente de concentración puede variar. En este caso, las concentraciones en la superficie de la membrana no es la misma que la concentración del fluido. El efecto producido por la capa de polarización provoca cambios en la permeabilidad a través de la membrana, puesto que los solutos de la disolución llegan a la capa de la polarización por convección, se acumulan y posteriormente vuelven al corriente de la alimentación por medio de un efecto lento de contradifusión, este efecto se puede apreciar en la Figura 6. En consecuencia, la membrana no trabaja debidamente, reduciendo la cantidad de permeado obtenido y su eficiencia [Baker, 2004][Gitis et al, 2016].

Para disminuir los efectos producidos de la polarización por concentración se ha de tener en cuenta ciertas variables como la instalación y el diseño de operación. Aplicar flujos tangenciales en la membrana o trabajar con regímenes turbulentos son algunos de los ejemplos a seguir a la hora de trabajar con membranas.

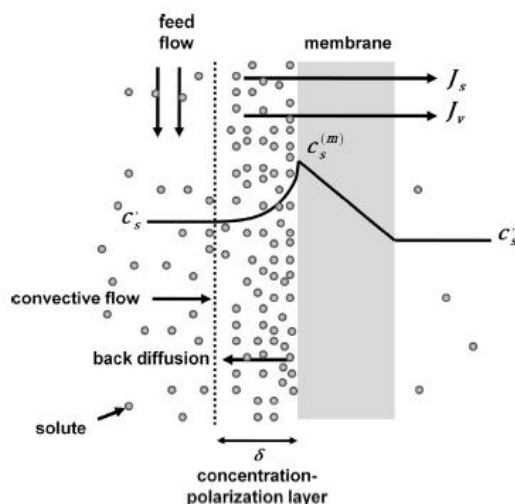


Figura 6.Efecto de la capa de polarización[Fuente: Pagès et al., 2013]

3.7.2. Exclusión de Donnan

La interacción electrostática entre los iones y la superficie de una membrana que se encuentre cargada es uno de los mecanismos de retención de iones en membranas. La repulsión de los iones de la superficie de la membrana puede ser explicada por la exclusión de Donnan.

Cuando una membrana cargada entra en contacto con una disolución iónica, los iones con el mismo signo de carga que la membrana (co-iones) tienden a ser excluidos y su paso a través de la membrana se ve impedido, mientras que los que tengan signos opuestos a la membrana (contra-iones) ven favorecido su paso a través de la membrana [Peeters, et al,1999]. El efecto de la exclusión de Donnan se puede apreciar en la Figura 7.

Se ha comprobado que en el caso de los iones divalentes (doble carga eléctrica) se rechazan de forma más efectiva que los monovalentes (una carga eléctrica). Hay que tener en cuenta que el fenómeno de exclusión de Donnan debe coexistir con el principio de electroneutralidad lo que explica el paso (o retención) de co-iones y contra-iones no esperados en base solamente al fenómeno de exclusión de Donnan.

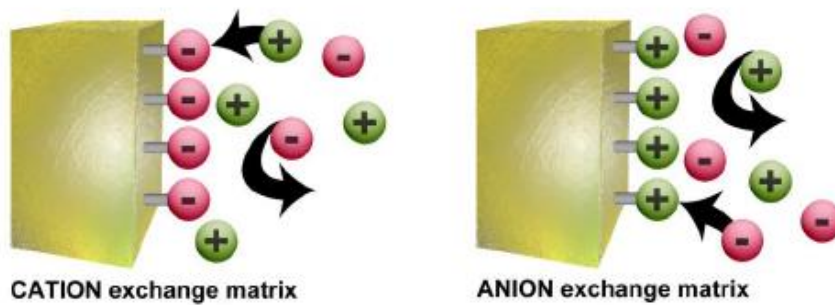


Figura 7. Exclusión de Donnan [Fuente: Galindo, 2015]

3.7.3. Exclusión dieléctrica

La exclusión dieléctrica está causada por la interacción de iones con una carga eléctrica que ha sido inducida por otros iones que se encuentran presentes en la interface de medios con diferentes constantes dieléctricas, generalmente, entre la matriz de una membrana (con una baja constante dieléctrica) y una disolución (alta constante dieléctrica). Esto causa que los iones procedentes de un medio con constante eléctrica alta induzcan a los iones del mismo signo del medio con menor constante dieléctrica, causando una repulsión entre el ión y la membrana, dando lugar a la exclusión de iones por los poros de la membrana [Yaroshchuk,2000].

En el mecanismo de exclusión dieléctrica los iones con doble carga eléctrica (iones divalentes) se rechazan mejor que los iones con una simple carga eléctrica (iones monovalentes). Aunque este hecho se le puede atribuir también al efecto producido por la exclusión de Donnan, el mecanismo de rechazo de la exclusión dieléctrica es más efectivo al que presenta la exclusión de Donnan, la razón es debido a que una membrana puede tener o no una carga fija, en cambio, la existencia de una baja constante dieléctrica en la matriz de la membrana está más allá de cualquier duda [Yaroshchuk,2000].

Al mismo tiempo, la exclusión dieléctrica puede provocar un aumento en el efecto producido por la exclusión de Donnan en los iones, por lo que la interacción de estos dos mecanismos resulta no trivial [Yaroshchuk,2000].

3.7.4. Doble capa eléctrica

Muchos de los solutos presentes en una disolución se encuentran cargados (iones). Por otro lado, y como se ha mencionado, el material de la membrana puede estar cargado eléctricamente, debido a la química de los grupos funcionales que conforman la materia. Ejemplos de grupos funcionales habitualmente presentes en las membranas de NF son los grupos carboxílicos o sulfónicos, los cuales pueden estar protonados o desprotonados (y por lo tanto mostrar carga eléctrica) en función del pH del sistema. Esta carga afecta al flujo de la transmembra y al rechazo de los solutos y por lo tanto esto convierte un factor a considerar a la hora de trabajar con membranas.

En la práctica, medir y evaluar la carga superficial de una membrana es dificultoso. La complejidad de la medida y la evaluación es debido a la presencia de una doble capa eléctrica (EDL) que cubre la superficie de la membrana mediante la presencia de dos capas con carga eléctrica. La primera capa, generada por contra-iones presentes en la disolución hace que sean atraídos a la superficie de la membrana. Esta capa, conocida como capa no agitada, estará fijada permanentemente en la membrana y no podrá ser removida de ella. La segunda capa es el resultado de la formación de una capa difusa de contra-iones, generado por el equilibrio dinámico de contra-iones que quieren adherirse a la superficie de la membrana, pero que se encuentran repelidos por la capa no agitada debido al hecho que tienen carga idéntica [Schoch et al., 2008][Gitis et al., 2016].

La segunda capa, no puede ser eliminada, pero puede ser remodelada bajo la influencia de una fuerza externa, por lo que la medición del potencial eléctrico dentro de la capa puede indicar indirectamente como la carga superficial de una membrana y un electrolito afectarán en el proceso de filtración. El grosor de la EDL será inversamente proporcional a la fuerza iónica, condicionando el rechazo de las especies. En el caso que la fuerza iónica sea elevada, la EDL será fina, dejando pasar tanto de aniones como de cationes, hecho que provoca que el rechazo de las dos especies sea menor. En el caso contrario, con una fuerza iónica baja, el grosor de la de la EDL será más grande, dejando pasar una menor cantidad de iones provocando un rechazo más alto [Schoch et al., 2008][Gitis et. al., 2016]. La variación del grosor de la EDL en función de la fuerza iónica se contempla en la siguiente Figura.

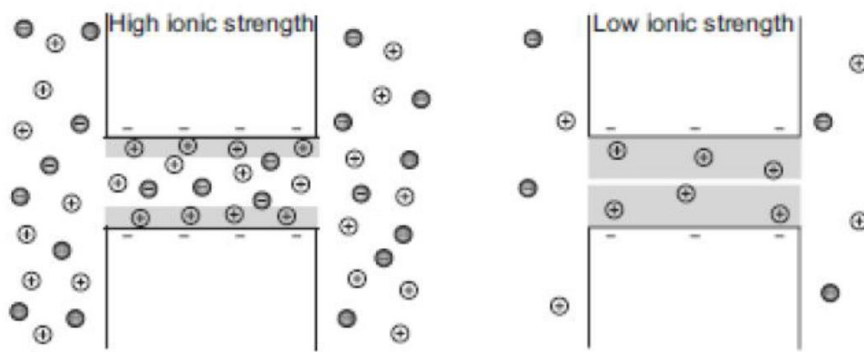


Figura 8.Efecto de la fuerza iónica en la doble capa eléctrica [Fuente: Schoch et al., 2008]

Dependiendo de la membrana y de la configuración de la medición, el valor del potencial eléctrico en la segunda capa puede ser denominado *zeta potential* en medidas estáticas o *streaming potential* en medidas dinámicas. Obtener el valor del potencial eléctrico en la segunda capa permite obtener información sobre la extensión y el signo de polaridad del potencial zeta, y así poder sacar conclusiones sobre la carga en la superficie de las membranas, como ya se había comentado [Gitis et al, 2016]. Su cálculo se efectúa mediante la siguiente fórmula:

$$\zeta = \frac{\Delta E \cdot \eta \cdot k}{\Delta P \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

ζ : Potencial zeta (mV)

ΔE : Diferencia de potencial (mV),

ΔP : Presión aplicada (Pa)

η : viscosidad dinámica del electrolito (Pas),

k : Conductividad del electrolito ($1/(\Omega\text{m})$),

ϵ : permitividad dieléctrica del agua

ϵ_0 : permitividad del vacío ($\text{C}^2/(\text{Nm}^2)$)

Normalmente el valor del potencial Zeta variará en función del pH de la solución. Para puntos donde el pH es bajo se obtienen un valor positivo, mientras que para puntos donde el pH es alto valor es

negativo. Existe un valor de pH donde la carga neta de la membrana es igual a 0, y es este punto el conocido como punto isoeléctrico (IEP)[Gitis et al., 2016].

4. Nanofiltración

4.1. Historia de la Nanofiltración

La separación de sales monovalentes, divalentes y de solutos orgánicos con un peso molecular por encima de los 1000 g/mol, caracterizó la selectividad de una región de membranas que se encontraba entre procesos de separación de la UF y la RO. El rango característico de separación de estas membranas definió lo que hoy conocemos como las membranas de Nanofiltración (NF), aunque antiguamente fuera denominado como membranas abiertas de RO, membranas intermediarias RO/UF, membrana RO selectiva, membranas ajustadas de UF. Así que realmente se puede decir que la NF empezó como un subproducto de la RO y de la UF [Schäfer, et al,2004].

Los comienzos de la NF están entrelazados con los primeros días de la RO, que son vivamente descritos por Loeb en su trabajo "*Reminiscences and Recollections*". Pero su primera aparición fue en 1959, cuando Loeb y Sourirajan experimentaron con membranas de acetato de celulosa porosas obtenidos de Schleicher and Schuell (S&S), para la producción de agua potable procedentes de soluciones salinas [Schäfer, et al,2005].

Desgraciadamente, estas membranas de acetato de celulosa tenían una gran deficiencia, principalmente causada por su pobre estabilidad biológica y química (hidrólisis de los grupos acetatos), dando lugar a una disminución en el rechazo de solutos y en el flujo. Es por eso que viendo el potencial que tenían las membranas de NF en los procesos de la industria química, sobre todo en aquellas operaciones que trataran sobre el tratamiento de aguas, se decidió a mediados de 1970 desarrollar membranas estables basados en compuestos no celulósico. Para llevar a cabo este desarrollo se buscaba principalmente membranas que siguieran las siguientes características: una alta retención de solutos orgánicos con un alto flujo de agua en el permeado, una estabilidad mecánica, biológica, pH y de oxidantes, alto rechazo de sales monovalentes y divalentes, una buena resistencia a flujos de trabajos altos ... El resultado llevó a la creación de membranas asimétricas de policloruro de vinilo (PVC), poliamidas, polietersulfones (PES), poliacrilonitrilo (PAN), poliacetales, poliacrilatos, copolímeros de PAN/PVC, óxido de polifenileno , etc [Schäfer, et al,2005].

Hoy en día, la NF es una tecnología con un gran potencial que permite solucionar diversos retos de separación en campos tan diversos como el pretratamiento de la desalación del mar, la retención de iones en disoluciones acuosas, la separación y concentración de componentes bioactivos para su posterior uso en la fortificación de alimentos, el desmineralizado, remoción de color y la desalinización entre otros. Actualmente, las membranas de NF las podemos encontrar con diferentes configuraciones ya sean tubulares, en espiral, planas, capilares y de fibra hueca,

fabricadas a partir de un rango amplio de materiales incluyendo derivados de celulosa, polímeros sintéticos, materiales inorgánicos e híbridos de orgánicos/inorgánicos [Schäfer, et al,2005].

4.2. Membranas cerámicas

Una definición estricta de objetos cerámicos sería el de objetos fabricados por materiales inorgánicos no metálicos que prescribe el uso de óxidos de metales o zeolitas, de hecho, en el caso de las membranas cerámicas los materiales como la alúmina y la sílice están entre los precursores más comunes de su fabricación. La estabilidad limitada de estas membranas y la mejora continua en su fabricación llevaron al uso de metales o derivados dando lugar al uso de materiales como el dióxido de titanio y la zirconia, para así obtener membranas mucho más estables (pero a la vez más caras). Informes recientes sobre la fabricación de membranas con óxidos de estaño y de hafnio o de mezclas de diferentes óxidos muestra que esta búsqueda a la mejora aún continúa. Hoy en día, las membranas cerámicas se definen como membranas que al menos una de sus capas está hecha por un material cerámico [Gitis et al., 2016].

Las membranas cerámicas pueden ser homogéneas, es decir, fabricadas por un único componente, o pueden contener diferentes materiales. La mayor parte de membranas son asimétricas y generalmente suelen estar compuestas por 4 o incluso 5 capas, pero ya eso dependerá del tipo de membrana de filtración que se quiera conseguir, es decir, de la operación que se quiera realizar. La Tabla 2 informa sobre el número de capas presentes en los diferentes procesos de separación. La capa inferior es conocida como la capa de soporte, la cual tiene que proporcionar la máxima resistencia posible a la membrana (por lo que el soporte a menudo es de más de 1mm de grosor y macroporoso). Dichos soportes son muy estables, pero también resistentes al flujo de transmembrana. Las capas intermedias son las que proporcionan buena estabilidad química y térmica, con una reducción en el tamaño del poro y con una superficie lisa homogénea. El ancho de los poros de estas capas ronda entre los 2-50nm de diámetro. Finalmente, la capa superior es la responsable de la separación de las partículas grandes de las pequeñas debido a que es la que contiene los poros más pequeños en la estructura de las membranas [Gitis et al., 2016].

Tabla 2. Tabla informativa sobre el número de capas en función del proceso de separación [Fuente: Gitis et al., 2016]

Separation process	Number of layers	Average pore size
Microfiltration (MF)	1	5 μm
	2	0.25 μm
Ultrafiltration (UF)	3	100 nm
Nanofiltration (NF)	4	2 nm
Reverse osmosis (RO), gas separation, pervaporation, vapour permeation	5	10 Å

Existen numerosos métodos para la preparación de membranas cerámicas. Estos incluyen una lixiviación estructural o la sublimación de un componente de la mezcla, pirolisis, sinterización de partículas en polvo de materiales cerámicos en suspensión, la síntesis del sol-gel, el uso de tratamientos hidrotérmicos, la deposición química de vapor (CVD), etc. Esta gran variedad de métodos es el reflejo de los diferentes materiales con los que se pueden fabricar una membrana. En muchos casos, las membranas con diferentes capas son fabricadas con diversos materiales, por lo que es necesario aplicar un método adecuado para cada material en específico. Generalmente las capas de soporte están fabricadas a partir de un elemento denominado α -alúmina por el método de extrusión. Esto da a la membrana cerámica un soporte con poros del tamaño micrométrico y de un espesor de profundidad milimétrica, mientras que las capas intermedias son típicamente preparadas por la γ -alúmina por recubrimiento por inversión de la capa de soporte seguido de una calcinación. Sobre la capa superior, que determina la habilidad de separación de la membrana, puede ser formada usando diferentes materiales y diferentes métodos. Estos métodos incluyen la síntesis de sol-gel de los dióxidos de silicio, de titanio y de zirconio, deposición de vapor químico de sílice, pirolisis del carbón, tratamientos hidrotérmicos, etc [Gitis et al., 2016].

4.2.1. Tipos de membranas cerámicas

Alúmina

El material que más asociado está con las membranas cerámicas es el óxido de aluminio (alúmina, Al_2O_3). La alúmina es un compuesto que tiene una buena estabilidad química y térmica, con una buena resistencia y buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. Tiene varios alótropos, incluyendo la α -alúmina y la γ -alúmina, que suelen ser usadas en la preparación de las membranas cerámicas. Las membranas cerámicas de alúmina son usualmente fabricadas por la síntesis de la α -alúmina y la γ -alúmina a altas temperaturas ($>1300^\circ\text{C}$) [Gitis et al., 2016].

Sílice

El dióxido de silicio (SiO_2 , comúnmente conocido como sílice, del latín *sillex*) es otro material inorgánico frecuentemente usado en la fabricación de membranas cerámicas. El revestimiento de las capas de estas membranas está realizado por los métodos de CVD y sol-gel. Los resultados obtenidos con estos métodos es que con CVD se obtiene una formación de ultra-microporos (menos de 0,7nm) perfectas para procesos de separación con bajos flujos. Con el método de sol-gel se producen super-microporos (entre 0,7 y 2 nm) que resultan menos selectivos, pero permite trabajar con altos flujos. Las membranas de sílice son altamente populares en una gran variedad de procesos de separación, desde separación de gases a la desalinización del agua. El mayor problema de estas membranas es su inestabilidad hidrotérmica. Generalmente la vida de de estas membranas microporosas son cortas a temperaturas moderadas ($<100^\circ\text{C}$). La humedad y el calor, incluso en condiciones de 200°C provocan una reducción de los poros debido a la migración de moléculas de sílice a los pequeños poros de la membrana y los bloquean [Gitis et al., 2016].

Titania

Dióxido de titanio (TiO_2) es otro popular material usado para la fabricación de membranas de cerámica, buscado por su excelente resistencia química a pH ácidos como básicos. Las membranas de titania tienen un punto isoeléctrico alrededor de un pH de 5,5 [Gitis et al., 2016].

Las partículas del dióxido de titanio tienen extensos usos en pinturas y barnices como en plásticos y papeles. El punto de fusión del mineral de rutilo (mineral de titania que cristaliza de forma tetragonal distorsionada y con el que se suele trabajar para la fabricación de estas membranas) ronda los 1800°C [Gitis et al., 2016].

En las membranas cerámicas, la aplicación del dióxido de titanio se usa para crear una capa de revestimiento en un material o para crear una capa independiente, es decir, la producción de un material formado únicamente por una capa de titania. La capa independiente da lugar a la producción tubos de diámetro nanométrico y de longitud micrométrica. Estas son obtenidas de nanopartículas de dióxido de titanio ya sea por la síntesis de componentes alcóxidos de titanio sobre condiciones alcalinas o por un ataque hidrotérmico directo de nanopartículas de dióxido de titanio sobre condiciones alcalinas. Estos nanotubos son muy porosos y dejan pasar el fluido a través de ellos además cuentan con una estabilidad estructural muy deficiente y no pueden ser ensamblados en ningún módulo. Suelen ser usadas en reacciones catalíticas. El revestimiento de capas con dióxido de titanio suele usarse para la producción de membranas de filtración (como la membrana de NF de este proyecto), para ello se debe aplicar el método de sol-gel. El resultado de usar este método es que se consiguen membranas con un tamaño en sus poros por debajo de 5nm [Gitis et al., 2016].

Zirconia

El dióxido de zirconio (Zirconia, ZrO_2) es uno de los materiales más populares en la fabricación de membranas cerámicas. Su popularidad radica en su estabilidad química, especialmente en soluciones alcalinas. Su punto isoeléctrico se encuentra sobre un pH de 7 [Gitis et al., 2016].

Zeolitas

Otro material común en la fabricación de membranas son los minerales de aluminosilicatos cristalino-hidratados denominados zeolitas. Las zeolitas fueron descubiertas en 1756 y por 200 años fueron usadas en procesos de adsorción. Algunas zeolitas poseen una excepcional estabilidad térmica y química. Hoy en día unas 200 familias de zeolitas son usadas en procesos tecnológicos, incluyendo la catálisis, la adsorción, intercambio iónico y por supuesto la separación. Las membranas de zeolita pueden ser preparadas únicamente con este material, sin necesidad de la presencia de la α -alúmina y la γ -alúmina [Gitis et al., 2016].

Este tipo de membranas tiene una estabilidad térmica sobre los 400-500°C y su resistencia a los solventes orgánicos es una gran ventaja. Las membranas de zeolitas pueden ser usadas en separación de gases y en reactores de membranas catalíticas a elevadas temperaturas [Gitis et al., 2016].

4.3. Membranas cerámicas vs membranas poliméricas

Tal y como especifica su nombre, las membranas poliméricas son aquellas que están fabricadas por materiales poliméricos, los más comunes de los cuales son la polisulfona o la poliamida. Al igual que ocurría con las membranas cerámicas, el material usado para su fabricación define mucho sus características como el pH al que pueda trabajar, la temperatura que soportan o su periodo de operación. Las membranas poliméricas de NF más utilizadas son la NF-270, la Hydracore 70pHT y la ESNA¹.

Existen diversas diferencias entre las membranas cerámicas y las poliméricas. Entre ellas la más evidente es el material con el que están fabricados y el proceso de fabricación, pero esto no es razón suficiente por la que las membranas poliméricas tengan un gran dominio sobre el mercado respecto a las cerámicas. La razón a este suceso es muy simple y es que las membranas

¹ Ver Anexo A: Descripción de membranas poliméricas

poliméricas son cinco veces mucho más baratas que las membranas cerámicas, razón por la cual son preferidas en los diferentes proyectos que impliquen el uso de membranas. Las membranas cerámicas requieren de carísimos materiales para empezar, sus procesos de fabricación son complejos y consisten en múltiples etapas. Pero eso no quiere decir que las membranas cerámicas no tengan muchas ventajas que permitan su introducción en el mercado de la industria. Estas membranas tienen una gran utilidad en los procesos de separación de gases y gradualmente se están introduciendo en el mercado de tratamientos de agua y de eliminación de residuos. Y es debido a su robustez que las membranas cerámicas son unas de las aplicaciones que más rápidamente están evolucionando para su uso en los tratamientos de líquidos.

La principal característica que permite diferenciar a las membranas cerámicas sobre las poliméricas es que pueden trabajar con flujos altos y tienen largos periodos de vida. Se han documentado flujos de caudal superiores a $360 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ atravesando membranas cerámicas que es un promedio superior al de las membranas poliméricas [Gitis et al., 2016]. A todo esto, hay que añadirle que experimentos con flujos altísimos sobre membranas poliméricas demostraron la presencia de un deterioro selectivo, cosa que no se ha observado con membranas cerámicas [Gitis et al., 2016].

En comparación a las membranas poliméricas, las membranas cerámicas son estables tanto mecánicamente, térmicamente y químicamente. Como ya se ha mencionado, esta durabilidad a largo plazo representa una de las mayores ventajas de las membranas cerámicas, aunque hay que decir que siempre se está intentado mejorar este rasgo de durabilidad en las membranas poliméricas. En la Tabla 3 se puede observar algunas de estas ventajas que están presentes en las membranas cerámicas, así como sus inconvenientes y las aplicaciones que se les puede dar.

A pesar de todas estas ventajas de las membranas cerámicas que se han comentado hay un factor que no hay que olvidar, y es que las membranas cerámicas dependen fuertemente del material cerámico usado en su proceso de fabricación. Un buen ejemplo se podría encontrar en las diferentes membranas cerámicas que se han descrito con anterioridad, donde las membranas de Titania tienen una buena resistencia tanto con soluciones de pH ácidos y básicos mientras las membranas de Zirconia solo tienen una buena resistencia si trabaja con soluciones con pH alcalino.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las membranas cerámicas [Fuente: Gitis et al., 2016].

Advantages	Disadvantages	Current status	Applications
Thermal stability (> 200 °C)	Low hydrothermal stability of composite membranes with a silica top layer. Complicated sealing at high temperatures	Surface modification to improve hydrothermal stability	Reactions at high temperature, pervaporation, gas separation
Resistance to organic solvents	Expensive source materials, complex processing; relatively high capital installation costs		Separation of organic liquids and oils, wastewater treatment
Chemical stability over a wide pH range	Difficult sealing and module construction		Chemical cleaning, separation at extreme pH, recovery of acids/bases
Long-time operational stability, no ageing, potentially lower life cycle cost	Low packing density		Small-scale applications
Mechanical stability under large pressure gradients	Brittleness incurs special configurations and supporting systems		Operation at high flux (up to 500 l/(m ² h)), backwashing at high flux
High structural integrity	Relatively high installation and modification costs in case of defects	Depends on the separation process	
Uniform pore size distribution	Difficulty to achieve high selectivity on a large scale		Precise size-based separations in pharma and bio applications
(Electro)catalytic and electrochemical activity easily realizable	Low permeability of high-selectivity (dense) membranes at medium temperatures		Solid oxide and other dense electrolyte fuel cells

4.4. Ensuciamiento y limpieza de las membranas cerámicas

Ensuciamiento

Una membrana puede estar trabajando con un flujo constante o con una presión de trabajo constante. En el caso del flujo sea constante, el flujo que atraviesa la membrana se mantendrá constante, pero la TMP (presión de transmembrana) incrementará a medida que la operación avance. En el otro caso, cuando la presión de trabajo se mantenga constante, la presión se mantendrá constante, pero el flujo decrecerá [Gitis et al., 2016]. En ambos casos, los parámetros durante la operación van cambiando y la membrana se irá deteriorando. Esto es debido al ensuciamiento de la membrana, definido como el proceso resultante en pérdidas del desempeño de la membrana, producido por la deposición de sustancias disueltas o suspendidas en su superficie externa, como en el comienzo de los poros o adentro de ellos. La deterioración es tan severa que las operaciones de membrana deben ser detenidas para realizar una limpieza.

La pérdida de la eficiencia de la membrana puede ser causada por dos fenómenos, aunque uno de ellos solo es llamado ensuciamiento. El otro fenómeno es la pre-concentración de solutos cerca de la superficie de la membrana provocando una preferencia en el paso de solventes a través de

la membrana, este fenómeno ya ha sido explicado con anterioridad es el conocido como "polarización por concentración".

El ensuciamiento puede ser de cuatro tipos, atendiendo a su naturaleza: inorgánico, coloidal, orgánico y microbiológico.

El ensuciamiento inorgánico es el causado por la acumulación de precipitados inorgánicos en la superficie de la membrana o en el interior del poro. La precipitación se forma cuando la concentración de especies químicas excede la solubilidad límite. Un buen ejemplo de este tipo serían las acumulaciones debido a las sales.

El ensuciamiento coloidal ocurre con diferentes tipos de partículas, algas, bacteria y ciertos materiales orgánicos, (éstos últimos siempre y cuando su rango de tamaño sea el de minúsculas partículas o de coloides).

El ensuciamiento orgánico es causado por solutos orgánicos con un peso molecular entre los mil y un millón de Da (Dalton, $1\text{Da} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). Por ejemplo, las proteínas presentes en los procesos de biopurificación y en la industria alimentaria. Este ensuciamiento es causado por las interacciones soluto-solvente-membrana por efectos estéricos, electroestáticos o covalentes.

El ensuciamiento microbiológico es el resultado de la formación de una biopelícula en la superficie de la membrana. Ocurre cuando una población de microorganismos se adhiere a la membrana, la coloniza y en su crecimiento y multiplicación produce sustancias poliméricas extracelulares que tienen una consistencia de gel viscoso, limoso e hidratado. Este tipo de ensuciamiento deja en la membrana una densidad de carga negativa en la membrana.

Limpieza

La limpieza de las membranas puede ser definida como un proceso por el que un material es liberado de una sustancia que no es parte integral de ese material. Una eficiente limpieza debería permitir una limpieza de la membrana tanto física, microbiológica como química. Las limpiezas de las membranas deben mostrar un adecuado flujo y una eficiencia en la separación, es decir, que se parezcan lo más posible a las características que tendría una membrana virgen. La limpieza de membranas es realizada por métodos físicos y químicos, todo irá en función del tipo de suciedad que tenga la membrana a tratar. En general es preferible los métodos de limpieza físicos que los químicos por dos razones. La primera razón es debido a que las limpiezas físicas resultan mucho más rápidas y baratas que las químicas. La segunda razón es debido al daño que puede sufrir la membrana por esa razón es más adecuada las limpiezas físicas que las químicas. Pero a pesar de todo, la limpieza química es uno de los métodos que se continúan usando, el principal motivo es la eliminación de todos los elementos que contaminan la membrana, cosa que no ocurre con los procesos físicos [Gitis et al., 2016].

La limpieza física consiste en forzar un líquido a moverse desde el lado del permeado hasta el lado de la alimentación usando una leve fuerza impulsora. De forma similar se puede realizar la limpieza usando aire para mejorar la eliminación del soluto retenido en la membrana.

La realización de la limpieza química es mediante el uso de agentes químicos como agentes cáusticos como el NaOH típicamente usado para eliminar contaminantes procedentes de agentes orgánicos o microbiológicos, o agentes ácidos como ácido cítrico y el ácido nítrico usado principalmente para eliminar óxidos de metales, o agentes quelantes como el ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA) usado para eliminar cationes divalentes, o incluso enzimas para la eliminación de proteínas. Para el uso de esta limpieza no es necesario el desmantelamiento del módulo de la membrana, simplemente basta con introducir el agente limpiador a través de ella.

Ambos procesos de limpieza pueden afectar a la membrana de diferentes formas, como su vida útil, solo que las limpiezas químicas afectan de una forma mucho más rápida que las físicas. Debido a este efecto, la comprobación de la membrana después de un lavado se ha vuelto una medida muy estándar en cualquier operación de membrana.

4.5. Factores que influyen en el proceso de filtración de las membranas cerámicas de Nanofiltración

Como ya sea comentado en el apartado 2, las AAM han ocasionado que se generen varios problemas de contaminación medioambiental, debido a la aparición de enormes cantidades de sulfatos y metales. La presencia de estas grandes concentraciones, ha hecho que se consideren diferentes métodos para intentar tratarlas. Entre esos métodos están los tratamientos mediante el uso de membranas de NF.

En este proyecto se han usado disoluciones que contenían compuestos químicos que pretendían simular las aguas ácidas de minas. Factores como la concentración del compuesto en la disolución, el nivel de pH o el ensuciamiento de la membrana pueden afectar en el proceso de filtración. Otros factores como el tipo de membrana a trabajar (si son de zirconia, alúmina, titania...) o el tamaño de los poros y la distancia entre ellos también pueden afectar en el proceso de filtración, pero éstos ya dependen más de la configuración de la membrana usada que a factores que uno pueda variar para su estudio. En este proyecto no se contemplará el cambio de membrana y siempre se usará la misma membrana de cerámica (membrana de Titania (TiO_2)).

4.5.1. Variación de la concentración

Una variación de la concentración del soluto, provoca una variación de la fuerza iónica de la disolución. La fuerza iónica (I) de una disolución acuosa es empíricamente estimada a partir del nivel de interacción entre los iones y es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1} C_i \cdot Z_i^2 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

I : fuerza iónica

Z_i : Valencia del ión

C_i : concentración del ión i

Al observar la fórmula se puede concluir que un aumento de la concentración de sales provoca un aumento de la fuerza iónica, y un descenso de la concentración provoca un descenso de la fuerza. El efecto que produce una variación de la concentración en la disolución es tan importante que influye en el rechazo de las sales y en el flujo de permeado, este efecto se puede observar en las gráficas de la Figura 9.

En diversas investigaciones sobre el efecto de las concentraciones de sales en el desempeño de una membrana cerámica, se ha podido observar que el aumento de la concentración de las sales ha dado lugar a un empeoramiento en el trabajo de la membrana cerámica, provocando un descenso en el flujo de salida del permeado y del rechazo en sales [Chen et al., 2017]. El motivo de este empeoramiento es producido por el fenómeno de la doble capa eléctrica que ya se ha comentado con anterioridad [Chen et al., 2017].

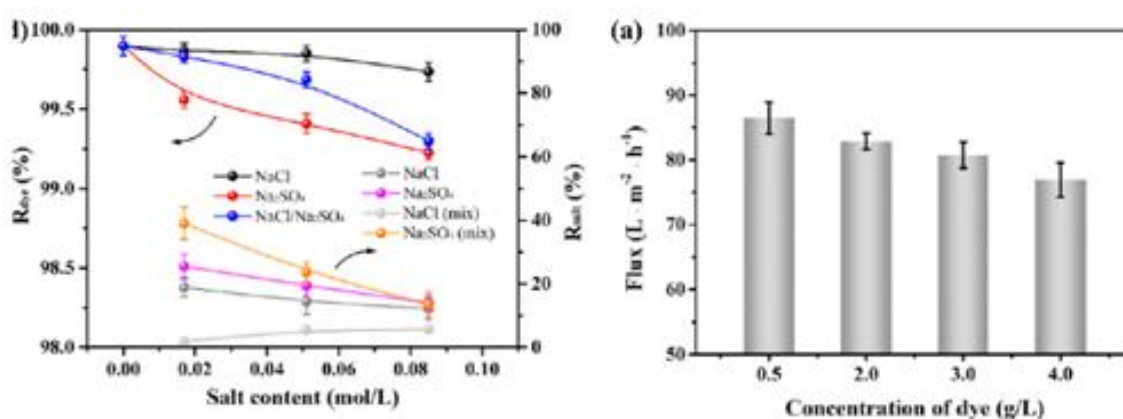
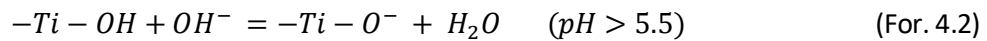
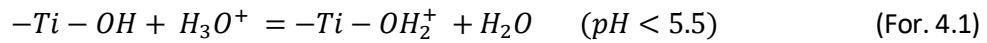


Figura 9. El efecto de la concentración en el rechazo de sales (izquierda) y en el flujo del permeado (derecha) [Fuente: Chen et al., 2017]

4.5.2. Efecto del pH

El pH de una disolución influye significativamente en el rechazo de los iones a través de las membranas. Las membranas de Titania se caracterizan por trabajar tanto en pH ácidos como básicos. Esta facilidad puede ser explicado por el comportamiento anfotérico (la capacidad de trabajar o reaccionar tanto en medios tanto ácidos como básicos) de los grupos hidroxilos presentes en la superficie de la membrana de Titania ($-Ti-OH$) [T. Van Gestel et al, 2002].



El trabajo a diferentes pH afecta a la carga de las membranas. De las fórmulas 4.1 y 4.2 se puede deducir que a pH de trabajos bajos las membranas de Titania adquieren una carga superficial positiva, y con pH altos adquieren una carga superficial negativa, es decir, que la carga en la superficie de membrana ira en función de la protonación o desprotonación de los grupos hidroxilos presentes en la superficie de la membrana. Analizar la zeta potencial de la membrana, permite evaluar fácilmente la carga de la capa superior de la membrana tal y como muestra la Figura 10.

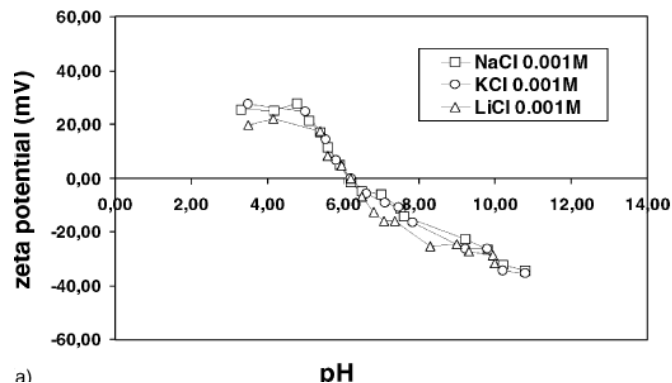


Figura 10. Carga de las membranas de titania a diferentes pH [Fuente: T. Van Gestel et al;2002]

La presencia de diferentes cargas en la membrana a diferentes pH afecta en el rechazo de los iones, provocando que en ciertos casos de estudio se obtenga más rechazo de iones con pH básico que ácido o viceversa tal y como muestran los gráficos de la Figura 11.

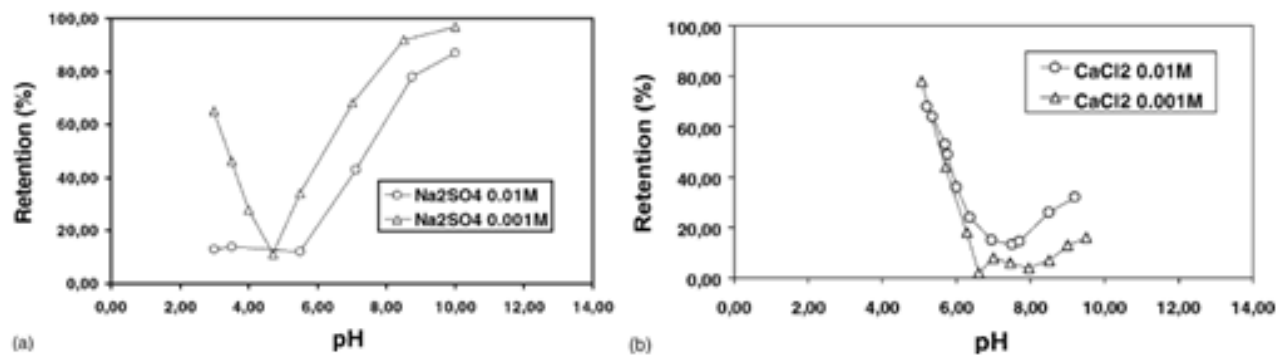


Figura 11. Efecto del pH en el rechazo de los iones procedentes de las sales [Fuente: T. Van Gestel et al;2002]

5. Solution-Diffusion-Film Model (SDFM)

El modelo de película de solución-difusión, término traducido del inglés solution-diffusion-film model (SDFM), es un modelo matemático usado para caracterizar y predecir el comportamiento de una disolución electrolítica, compuesta por una sal dominante y una sal traza que se encuentra en una concentración menor a la de la dominante.

El modelo se basa en la hipótesis que el transporte de los solutos a través de las membranas se realiza por difusión y migración eléctrica y no considera la convección. Considera que el rechazo observado es el rechazo basado en la diferencia de concentraciones entre la superficie de la alimentación y el permeado e introduce el concepto de rechazo intrínseco, que es el rechazo basado en la diferencia de concentraciones entre la superficie de la membrana y el permeado. De esta manera, el gradiente de las concentraciones superficie-permeado es superior en valor al gradiente alimentación-permeado y por tanto el rechazo intrínseco es superior al rechazo observado analíticamente [Pagès et al., 2013] [Yaroshchuk et al., 2011]

La ecuación básica que parte el modelo tiene en cuenta precisamente dos factores: el transporte de iones por gradientes de concentración y el transporte de iones por un campo eléctrico. La diferencia de permeabilidades de la membrana entre el anión y el catión de la sal dominante (especie química, en este caso de estudio una sal, cuyos componentes predominan en la disolución sobre el resto de componentes) se origina en este campo eléctrico, el cual controla la transferencia de iones a través de la membrana [Yaroshchuk et al., 2011]

$$J_i = J_v \cdot c_s'' = -D_i \cdot \left(\frac{dc_i}{dx} + z_i \cdot c_i \frac{d\varphi}{dx} \right) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

J_i : flujo de transmembrana del soluto [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

J_v : flujo volumétrico de transmembrana [m/s]

c_s'' : concentración de la sal dominante al permeado [mol/m^3]

D_i : coeficiente de difusión del soluto i [m^2/s]

dc_i/dx : gradiente de concentración a través de la membrana [mol/m^4]

c_i : concentración del soluto i [mol/m^3]

Z_i : carga del soluto i

$d\varphi/dx$: gradiente del potencial electrostático a través de la membrana [m^{-1}]

Puesto que la membrana presenta diferentes permeabilidades para cada ión, siempre habrá alguno que pase con una mayor cantidad que el resto, dando lugar a una acumulación de un ión que generará un campo eléctrico.

De medir experimentalmente el flujo de transmembrana (J_v) y el rechazo de la sal dominante (R_s^{obs}), se puede iniciar la modelización de la sal dominante con el objetivo de encontrar la permeabilidad de la sal dominante (P_s) y la permeabilidad de la capa de polarización de la sal dominante (P_s^δ).

$$R_s^{obs} = 1 - \frac{c_s''}{c_s'} = \frac{J_v/P_s \cdot e^{-\left(J_v/P_s^\delta\right)}}{1 + J_v/P_s \cdot e^{-\left(J_v/P_s^\delta\right)}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde:

R_s^{obs} : rechazo observable de la sal dominante

J_v : flujo volumétrico de transmembrana [m/s]

c_s'' : concentración de la sal dominante al permeado [mol/m³]

c_s' : concentración de la sal dominante en la alimentación [mol/m³]

P_s : permeabilidad de la sal dominante [m/s]

P_s^δ : permeabilidad de la capa de polarización a la sal dominante [m/s]

El rechazo intrínseco (R_s^{int}) y la concentración de la sal dominante en la superficie de la membrana es calculado a partir de la concentración del permeado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$R_s^{int} = 1 - \frac{c_s''}{c_s^{(m)}} = \frac{J_v/P_s}{1 + J_v/P_s} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Donde:

R_s^{int} : rechazo intrínseco de la sal dominante

J_v : flujo volumétrico de transmembrana [m/s]

c_s'' : concentración de la sal dominante al permeado [mol/m³]

$c_s^{(m)}$: concentración de la sal dominante en la superficie de la membrana [mol/m³]

P_s : permeabilidad de la sal dominante [m/s]

Una vez se ha calculado la permeabilidad de la capa de polarización de la sal dominante (P_s^δ), se puede obtener el espesor de la capa de polarización.

$$\delta = \frac{D_s^\delta}{P_s^\delta} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde:

δ : Grosor de la capa de polarización [m]

c : Coeficiente de difusión de la sal dominante en la capa de polarización [m^2/s]

P_s^δ : permeabilidad de la capa de polarización a la sal dominante [m/s]

Para calcular D_s^δ o D_t^δ , que son los coeficientes de difusión de la sal dominante y del ión traza (partícula cargada eléctricamente presente en la disolución que no forma parte del compuesto dominante debido a su menor presencia) en la capa de polarización respectivamente, es necesario conocer las cargas tanto de los cationes como de los aniones, con sus coeficientes de difusión, los cuales se obtienen a través de los valores tabulados de la conductividad iónica. La expresión matemática para calcularlos es la siguiente:

$$D_{s,t}^{(\delta)} = \frac{(Z_+ - Z_-)D_+^{(\delta)}D_-^{(\delta)}}{Z_+D_+^{(\delta)} - Z_-D_-^{(\delta)}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Donde:

$Z_+, -$: cargas de los cationes y los aniones.

$D_+, -$: coeficientes de difusión de los cationes y los aniones [m^2/s]

$D_{s,t}^{(\delta)}$: coeficiente de difusión de la sal dominante/ión traza en la capa de polarización [m^2/s]

Dentro de la capa de polarización, existen gradientes de concentración de la sal dominante. Debido a las diferentes difusividades de los iones, estos gradientes dan lugar a campos eléctricos de origen de difusión. Estos campos actúan sobre los iones traza, lo que proporciona información sobre el acoplamiento eléctrico en la capa polarizada debido a la sal dominante. Todo esto se tiene que tener en cuenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{c_t^{(m)}}{c_t'} = e^{(Pe_t)} \cdot [1 + R_s^{obs} \cdot e^{(Pe_t)} - 1]^{b^{(\delta)}} \cdot \left\{ 1 - (1 + R_s^{obs}) \int_{e^{-(Pe_t)}}^1 \frac{dy}{[1 + R_s^{obs} \cdot y^{-\alpha} - 1]^{b^{(\delta)}}} \right\} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Donde:

c'_t : concentración de la sal traza en la alimentación [mol/m³]

$c_s^{(m)}$: concentración de la sal traza en la superficie de la membrana [mol/m³]

$Pe_{s,t} = P_s^\delta / D_{s,t}^\delta$: números de Péclet de la sal dominante(s) y de la traza(t)

D_s^δ : coeficiente de difusión de la sal dominante en la capa no agitada [m²/s]

$b(\delta) = \frac{Z_t(D_+ - D_-)}{Z_+D_+ - Z_-D_-}$: Coeficiente de difusión

$\alpha = D_t^\delta / D_s^\delta$: Razón de difusión de la sal traza respecto la dominante

Gracias al modelo, en el caso de una sal dominante con iones traza, la transmisión recíproca intrínseca de una traza (f_t) se puede representar como una función de la transmisión recíproca intrínseca de la sal dominante (f_s) de la siguiente manera:

$$f_t = (f_s)^{b(\delta)} + K \left(\frac{f_s - (f_s)^{b(\delta)}}{1 - b(\delta)} \right) \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Donde:

$$K = D_s / D_t$$

$$f_{s,t} = \frac{c_{s,t}^{(m)}}{c_{s,t}} = \frac{1}{1 - R_{s,t}}: \text{Transmisiones recíprocas intrínsecas de la sal dominante y la traza}$$

Por lo tanto, se puede comprobar que, en la ecuación anterior, los datos experimentales dependen solo de dos parámetros: b^δ y K .

Por último, las permeabilidades de la membrana de los diferentes iones de la sal dominante y de la traza se pueden estimar mediante las siguientes expresiones:

$$P_\pm = \frac{P_s}{1 - (Z_\pm / Z_t)^{b(\delta)}} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

$$P_t = \frac{P_s}{K} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Donde:

P_{\pm} : permeabilidad de la membrana a los iones de la sal dominante[m/s]

P_t : permeabilidad de la membrana a los iones traza[m/s]

6. Método experimental

Los experimentos que se presentan en este trabajo, se han realizado en una planta a escala laboratorio, donde el proceso de NF se ha llevado a cabo usando una membrana tubular de Titania (TiO_2), con unos diámetros en sus poros de 1nm. Esta medida de sus poros es la que hace que se encuentre en el intervalo en el que ambos mecanismos de transporte actúen (modelo poro-flujo y solución-difusión). Las características más notables de este tipo de membranas ya fueron descritas con anterioridad en el apartado 4.2. Con estos experimentos se intentará imitar las circunstancias que caracterizan a las AAM. Es por eso, que se trabajará con soluciones que permitan acercarse a las condiciones que presentan las aguas ácidas, variando los parámetros de pH y la cantidad de especies en la disolución, para que posteriormente se compruebe el rechazo de las especies químicas en disolución.

6.1. Planta de laboratorio

La planta que se dispone en el laboratorio es similar a la representada en la Figura 12, donde se puede apreciar los diferentes elementos que la componen y a su vez la disposición que muestra.

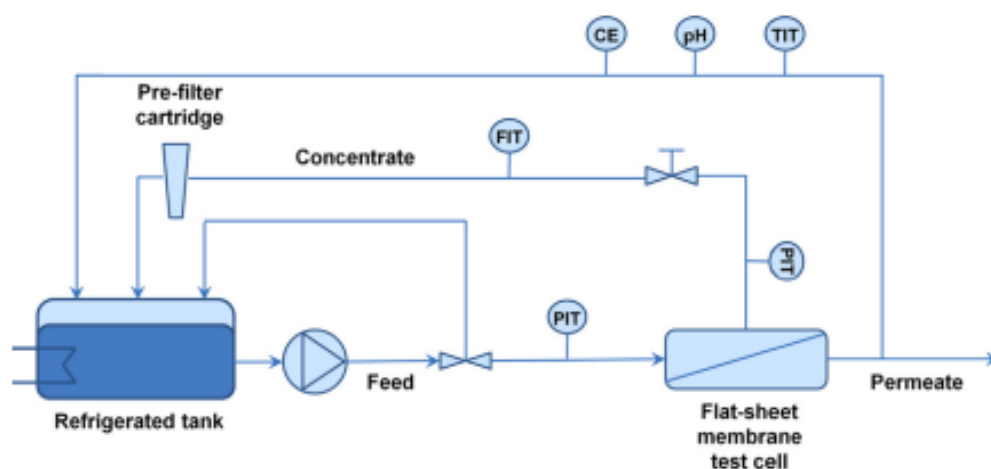


Figura 12. Modelo de una planta de laboratorio [Pagès et al., 2013]

Tal y como se puede observar, la planta está constituida por diversos elementos. La disolución a tratar se encuentra en un tanque con refrigeración, con una capacidad máxima de 30L (Figura 14). La disolución es impulsada por una bomba (Hydra Cell G-10, mostrada en la Figura 13) hacia el circuito que forma la planta. Los tubos que permiten la unión del tanque con la bomba están fabricados por PVC, mientras que los tubos que unen la bomba con el módulo de la membrana de NF son de acero inoxidable.



Figura 13. Bomba Hydra Cell G-10



Figura 14. Tanque de la disolución con refrigerador

La disolución que es impulsada por la bomba hacia el circuito está regulada por una válvula by-pass (Figura 15) instalada en la salida de la bomba, permitiéndonos controlar el caudal de entrada subministrado por la bomba. Cuando la disolución entra al módulo de la membrana, se originan dos corrientes: un corriente que ha podido atravesar la membrana tubular(permeado), y otro corriente que no ha podido(concentrado). Posteriormente estos dos corrientes son devueltos al tanque.

Antes de que la corriente del concentrado se dirija al tanque, cuando está sale del módulo de la membrana pasa primeramente por una válvula de aguja (Figura 16) y posteriormente por un filtro de cartucho (Figura 17). La válvula de aguja junto a la de by-pass permite un control total del caudal y de la presión a lo largo del circuito. El filtro, permite eliminar la presencia de impurezas que hubiera inicialmente en la disolución.



Figura 15. Válvula by-pass



Figura 16. Válvula de aguja



Figura 17. Filtro de cartucho

Del corriente del permeado, se tomarán las muestras a analizar. De estas muestras se tomarán los valores de pH y de temperatura mediante un pH-metro, la conductividad mediante un conductímetro y el peso de la muestra a través de una balanza.

Los valores de presión del circuito se medirán por medio de dos manómetros colocados en la entrada y en la salida del circuito. El caudal será controlado a partir de un caudalímetro situado

entre la válvula de aguja y el filtro. En la Figura 18 se puede observar la planta de laboratorio que ha sido descrita.

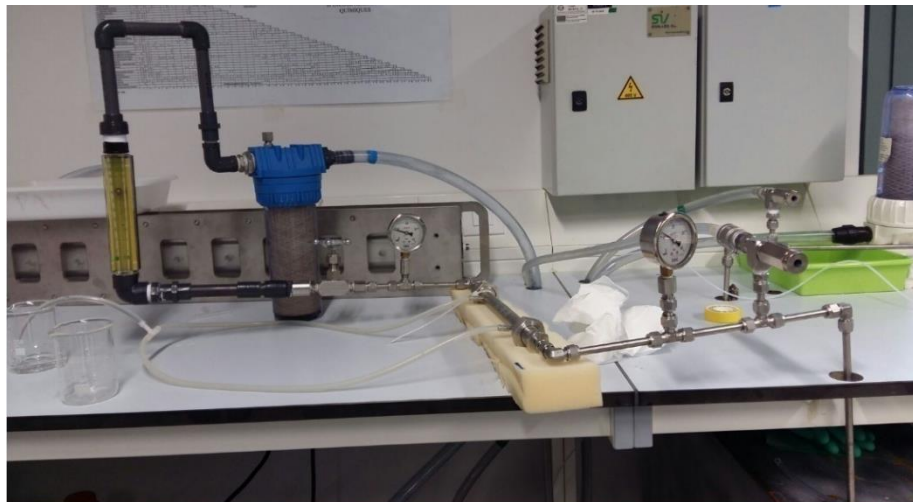


Figura 18. Planta piloto del laboratorio

6.2. Procedimiento experimental

Después de describir la planta donde se realizarán los experimentos, en este aparatado se describirán los procedimientos que se deben de realizar para dar comienzo al proceso experimental.

- **Preparación de la membrana**

El primer paso a realizares la preparación de la membrana. Para ello hay que sumergir la membrana tubular en agua Mili-Q (Figura 19) durante 24 horas para eliminar los productos que tenga debidos a su conservación.



Figura 19. Membrana de Titania sumergida en Mili-Q

- **Preparación del módulo y de la planta**

Una vez que esté limpia la membrana tubular de TiO_2 , esta se debe acoplar a su módulo tubular de acero inoxidable (Figura 20). Para ello únicamente hay que desenroscar la zona donde se encuentra el módulo y colocar la membrana dentro de ella y con cuidado de no romperla.

Posteriormente hay que colocar el filtro de cartucho en su lugar de trabajo. Este filtro se guardará en la nevera los periodos que no se tengan que usar, como los periodos de finalización del experimento. Esto se realiza para evitar la proliferización de microorganismos.

Una vez acoplada la membrana y colocado el filtro de cartucho se pueden iniciar los experimentos.

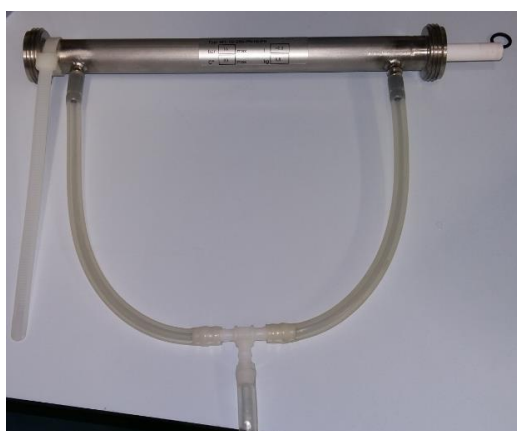


Figura 20.Membrana tubular de cerámica introducida en su módulo cilíndrico

- **Presurización de la membrana**

Para realizar una presurización adecuada es necesaria hacer pasar por la membrana agua desionizada. En este caso se cogieron un valor de presión de entrada de 13 bar con un caudal de salida del permeado de 8 L/min. Se escogieron estos valores porque se consideraron lo suficientemente elevados como para trabajar con ellos sin la necesidad de llegar a los valores máximos del circuito, puesto que acercarse al valor máximo de trabajo que puede soportar el módulo de la membrana (16 bar) y el caudalímetro (10 L/min) implica provocar daños irreparables en el circuito.

Una vez definido los parámetros de la operación, se inicia la toma de muestras. El procedimiento consiste en coger muestras de permeado cada 15 min, anotando los valores de pH, temperatura y conductividad de cada muestra. Este procedimiento se realizaría durante 1:15h como para que la permeabilidad de la membrana fuese constante.

- **Preparación de la disolución**

Las disoluciones con las que se trabajarán contendrán una concentración aproximadamente de 0,01 M de Na₂SO₄. Para conseguir tal concentración se calcula la cantidad de Na₂SO₄ que se tendrán que disolver en 25 L de agua desionizada. El cálculo se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$m_{\text{componente}} = \frac{PM_{\text{componente}} \cdot V \cdot C}{p} \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Donde:

$m_{\text{componente}}$: Masa del componente a añadir [kg]

$PM_{\text{componente}}$: Peso molecular [kg/mol]

V: volumen de la disolución [L]

C: concentración deseada [mol/L]

P: pureza del componente

Una vez obtenida la disolución de Na₂SO₄ con la concentración deseada, se utilizarán NaOH o H₂SO₄ para desplazar el valor del pH a las regiones más básicas o ácidas en función del experimento que se quiera realizar. Para los experimentos que contengan especies metálicas el método de cálculo resultará ser el mismo

- **Presurización de la membrana con la disolución**

Antes de dar comienzo con el experimento, es necesario presurizar la membrana con la disolución experimental. El procedimiento a seguir será exactamente idéntico al que se realizaba la presurización con agua desionizada.

- **Realización del experimento**

El proceso experimental es similar al seguido cuando se realizaba la presurización. Con un caudal constante de salida 8L/min, se irán tomando muestras del permeado en diferentes periodos de tiempo, generalmente con unos 7 minutos de diferencia. En cada periodo de tiempo se irá cambiando el valor de la presión de entrada, inicialmente empezando con una presión de 6 bar. hasta finalizar con una presión de 13 bar. Aparte de las muestras procedentes del permeado será necesaria la recogida de muestras procedentes de la alimentación para su posterior análisis.

Las muestras serán tomadas en viales previamente tarados. Seguidamente se pesarán de nuevo, pero esta vez con la muestra recogida para calcular el volumen exacto conseguido. Para finalizar se medirá la conductividad, temperatura y pH de la muestra.

Con los datos de conductividad que se recojan de cada muestra se podrá calcular el rechazo de la disolución. La fórmula a usar es la siguiente:

$$R = \left(1 - \frac{C_{\text{permeado}}}{C_{\text{feed}}}\right) \cdot 100 \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Donde:

C_{feed} : conductividad de la alimentación [mS/cm]

C_{permeado} : conductividad del permeado [mS/cm]

R: rechazo aproximado [%]

Los valores obtenidos del rechazo a partir de medidas de conductividad serán aproximados, puesto que no se tienen en cuenta las diferencias de rechazo entre las diferentes especies iónicas presentes en la disolución. Para determinar el rechazo de cada soluto, las concentraciones de éste se analizarán con cromatografía iónica.

Los rechazos que se conseguirán con la membrana no serán únicamente de los iones procedentes de un componente dominante, hay que tener en cuenta que también tendremos un rechazo de iones que no predominan tanto en la disolución como lo hacen los iones del componente dominante. Un ejemplo de estos iones, conocidos también como iones traza son los protones (H^+). El rechazo de los protones de hidrogeno se podrá observar a partir del análisis del pH de las muestras, cuyos valores serán obtenidos a partir del uso del pH-metro.

- **Limpieza**

Una vez finalizado los experimentos es necesario realizar una limpieza en la planta para poder eliminar la mayor cantidad de impurezas presentes en la membrana.

Primeramente, hay que realizar una limpieza de 30 minutos con agua desionizada a una presión de 6 bar y caudal de 8 L/min. De esta manera se podrán eliminar la mayor parte de los iones.

Una vez finalizado los 30 minutos, se procederá a realizar una nueva limpieza cambiando el agua desionizada. Este procedimiento será idéntico a cuando se realizaba la presurización con agua desionizada. Se tomarán de nuevo valores de conductividad y pH, durante 1:15h aproximadamente. Estos valores deberán ser similares a los obtenidos cuando se realizaba la presurización con agua, de no ser así significaría que aún quedan trazas de iones del experimento que podrían afectar al funcionamiento de la membrana, por lo que una nueva limpieza de 1:15h con una nueva agua desionizada sería necesaria.

Una vez terminada la limpieza, la membrana recuperaría la permeabilidad inicial y estaría preparada para realizar un nuevo experimento.

- **Cálculos experimentales**

En este apartado se darán a conocer una serie de parámetros que se deberán conocer a la hora de caracterizar los experimentos.

- Presión de transmembrana (TMP): el valor correspondiente a la media entre las presiones de entrada y salida marcadas por los manómetros. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$TMP = \frac{P_{alimentación} + P_{concentrado}}{2} - P_{permeado} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Donde:

$P_{alimentación}$: Presión de entrada de la alimentación en el módulo [bar]

$P_{concentrado}$: Presión en la salida del concentrado en el módulo [bar]

$P_{permeado}$: Presión de la salida del permeado del módulo

-Flujo volumétrico de transmembrana (J_V): caudal de permeado por unidad de tiempo y superficie [$L \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$] o [m/s]. Se define a partir de la siguiente ecuación:

$$J_V = \frac{Q_p}{A_{ef}} = \frac{V_p}{A_{ef} \cdot t_{ef}} = \frac{m_p / \rho}{A_{ef} \cdot t_{ef}} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Donde:

Q_p : Caudal de permeado [L/s]

A_{ef} : Área específica de la membrana [m^2]

V_p : Volumen del permeado [L]

t_p : Tiempo de recogida de muestra [s]

m_p : Masa del permeado [kg]

ρ : Densidad del agua a temperatura ambiente [kg/L]

-Presión osmótica: aquella presión que es necesaria aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable. Su valor puede ser calculado a través de la ecuación de Van't Hoff:

$$\Delta\pi = n_{iones} \cdot C_{disolución} \cdot R \cdot T \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Donde:

$\Delta\pi$: Presión osmótica[bar]

n_{iones} : número de iones de la sal dominante.

$C_{disolución}$: Concentración de sal dominante en la disolución [mol/L]

R : Constante de gases ideales [$8.314 \cdot 10^{-2}$ bar·L/mol·K]

T : Temperatura [K]

-Permeabilidad de la membrana (K_{dis}): se define como la facilidad que tiene la disolución para fluir a través de la membrana [$L \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$].

$$K_{dis} = \frac{J_V}{TMP - \Delta\pi} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

6.3. Diseño experimental

La investigación para averiguar la capacidad de retención de la membrana tubular de Titania se realizó mediante la formación de diferentes disoluciones que pretendía simular las aguas ácidas de mina. Para ello fue necesaria la preparación de dos tipos diferentes de disoluciones. La preparación de estas dos disoluciones permitió la diferenciación de dos casos experimentales a la hora de realizar la parte experimental.

Con el primer caso de la parte experimental, se pretendió realizar tantos experimentos como fuesen posibles con el objetivo de analizar el comportamiento de la membrana de Titania a la hora de eliminar la sal de Na_2SO_4 a diferentes pH de trabajo, y así conocer el posible comportamiento del Na_2SO_4 cuando se estudiase con iones metálicos. Para la realización de estos experimentos se tuvo que preparar una disolución de 25L de Na_2SO_4 a 0,01M. Además, el ajuste del pH se realizó añadiendo a la disolución H_2SO_4 para llevarla a zonas ácidas o añadiendo NaOH para acercarla a las zonas básicas. La Tabla 4 muestra el número de experimentos realizados con la disolución de Na_2SO_4 a 0,01 M y el pH de trabajo que se usó en cada experimento.

Tabla 4. Tabla de experimentos realizados

Experimentos del primer caso		
Nº	Concentración de Na_2SO_4	pH
1	0,01	1
2	0,01	1,8
3	0,01	2,8
4	0,01	3,9
5	0,01	4,8
6	0,01	6,3
7	0,01	9,73
8	0,01	11,23

El segundo caso consistió en la preparación de otra disolución de 25L formada esta vez por diversas sales de sulfato que contuvieran iones metálicos. La concentración de compuesto usado para preparar la segunda disolución se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Compuestos usados para la preparación de la disolución de 25L

Compuesto de sulfato	Concentración del compuesto (g/L)
Fe^{2+}	1
Cu^{2+}	0,6
Zn^{2+}	0,5
Na^+	2,3

Esta disolución formada a partir de múltiples compuestos, fue analizada a diversos pH ácidos. Posteriormente se determinó el rechazo del compuesto dominante y de los iones traza. El ajuste del pH se realizó añadiendo a la disolución H_2SO_4 para llevarla a zonas ácidas. La Tabla 6 muestra el número de experimentos realizados con esta nueva disolución y el pH de trabajo que se usó en cada experimento.

Tabla 6. Tabla del pH de trabajo

Experimentos del segundo caso	
Nº	pH
1	0,8
2	1,4
3	1,8
4	2,9

6.4. Análisis de las muestras

El análisis de las muestras de permeado a diferentes presiones de trabajo y de las dos muestras de alimentación en los diferentes experimentos se realizó utilizando los equipos de cromatografía iónica, absorción atómica, pH-metro y conductímetro.

6.4.1. Cromatografía iónica

La cromatografía es un método físico de separación que se basa en la separación de varios elementos que forman una mezcla. La división se realiza a partir de las características físicas y químicas que tienen los componentes de la mezcla. La realización de la cromatografía se logra a partir de la utilización de dos fases: una móvil que corresponde a la solución formada por diversos compuestos y una estacionaria formada por un líquido que recubre partículas sólidas o por partículas sólidas que se caracteriza por ser una fase estática y que tiende a retener las sustancias procedentes de la fase móvil en mayor o menor grado.

La cromatografía iónica es un tipo de cromatografía que permite la separación de iones y de moléculas polares a partir de las propiedades de carga de las moléculas. La solución que debe inyectarse se denomina "muestra" y los componentes separados se llaman analitos. En este tipo de cromatografía, los aniones o los cationes se unen covalentemente a la fase estacionaria sólida, por lo común una resina. Los iones de soluto, de carga opuesta a los de la fase estacionaria, son

atraídos por esta última mediante una fuerza electrostática. En este proyecto, se ha utilizado el equipo de cromatografía iónica DIONEX ICS-1000 (Figura 21), dotado de una columna para cationes (IONPAC® CS16) y otra para aniones (IONPAC® AS23). La columna catiónica utiliza como eluyente ácido metasulfónico (CH_3SO_3) 0,03 M, mientras que la de aniones usa una mezcla de 0,0045M bicarbonato de sodio (Na_2CO_3) y 0,0008M bicarbonato sódico (NaHCO_3). El equipo se usó para el análisis de los iones de Na^+ y de SO_4^{2-} . Previamente, se prepararon 5 disoluciones estándar en un rango de concentraciones de 10 a 300 ppm, de forma que la concentración estimada de las muestras se encontrase en el medio de la recta de calibración.



Figura 21. Equipo de cromatografía iónica del laboratorio

6.4.2. Espectrofotometría de absorción atómica en llama

La espectrofotometría es el método científico usado para la medición de luz absorbida por una sustancia química. La medición se realiza a partir de la intensidad de luz que un haz luminoso pasa a través de la solución a analizar. Esta medición también se puede usar para medir la cantidad de compuesto químico presentes en la sustancia analizar.

En la espectrofotometría de absorción atómica en llama las muestras son vaporizadas, debido a que la mayoría de las sustancias se descomponen en átomos en fase gaseosa cuando son sometidas a una temperatura suficientemente alta. La determinación de átomos a analizar se determina midiendo la absorción de haces de luz de las muestras vaporizadas. En este tipo de espectrofotometría la muestra líquida se aspira hacia una llama con una temperatura de 2000 a 3000K. La muestra se atomiza (se separa en átomos) en la llama y posteriormente a esta muestra atomizada se le hace llegar una fuente de radiación que emite luz con las frecuencias características al componente que se quiere analizar. En este proyecto, se usó un equipo de absorción atómica AANALYST 200 SNGL W/D2 (PERKIN ELMER) para el análisis de los iones metálicos de Fe^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} (Figura 22). Previamente, se prepararon 5 disoluciones estándar en un rango de concentraciones de 10 a 300 ppm para cada uno de los iones metálicos a analizar, de

forma que la concentración estimada de las muestras se encontrase en el medio de la recta de calibración.

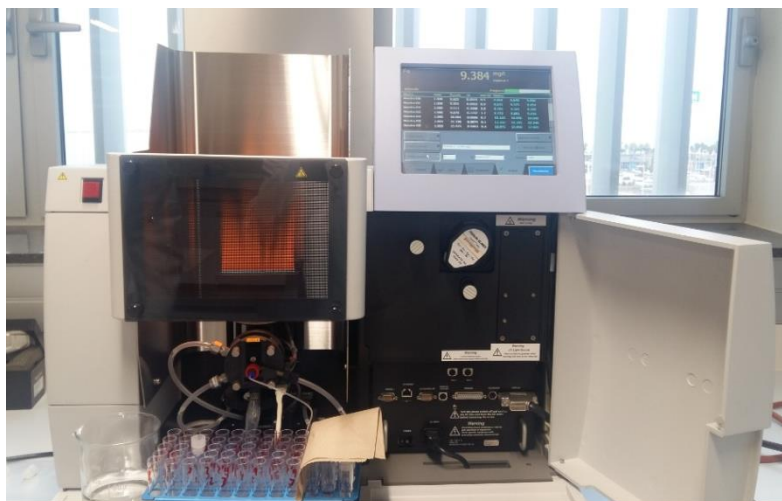


Figura 22. Equipo de absorción atómica del laboratorio

6.4.3. pH-metro

El pH-metro es un sensor que permite la medición de los protones de hidrogeno de una disolución. La determinación del pH se realiza a partir una celda formada por un par de electrodos, un electrodo de calomel (cloruro de mercurio) y un electrodo de vidrio sumergidos en la disolución a medir. El medidor de pH mide la diferencia de potencial eléctrico entre los dos los electrodos y a partir de esta diferencia de potencial se obtiene el pH de la disolución. En este proyecto partir del pH-metro GLP 201 (GRISOM) se pudieron obtener las concentraciones de H^+ (Figura 23). Previamente, se calibró el equipo con 3 disoluciones estandarizadas utilizando unos patrones de pH 4, pH7 y pH 9,72.



Figura 23. Equipo de pH-metro del laboratorio

6.4.4. Conductímetro

La conductividad eléctrica es una medida que nos indica la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar corriente eléctrica a través de él. En medios líquidos (una disolución) esta conductividad está relacionada a la presencia de sales presentes en una disolución, ya que la disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar energía eléctrica, por lo que la conductividad es una medida que te permite valorar la cantidad de iones presentes en una disolución, pero no te puede indicar su concentración de cada ión como lo permiten la cromatografía iónica o la absorción atómica.

El conductímetro es el aparato que permite la valoración de los iones presentes en la disolución, a partir de la medición de la resistencia eléctrica que ejerce el volumen de una disolución encerrado entre dos electrodos. Una vez calculada la resistencia en la pantalla muestra la conductividad de la disolución. En este proyecto el análisis de la conductividad se realizó a partir del conductímetro Basic 30(LEBORIZ) (Figura 24). Previamente, se calibró el equipo con 3 disoluciones estandarizadas utilizando unos patrones de calibración de $147\ \mu\text{S}/\text{cm}$, $1413\ \mu\text{S}/\text{cm}$, $12,88\text{mS}/\text{cm}$.



Figura 24. Equipo de conductimetría del laboratorio

7. Análisis de resultados y modelización de los datos experimentales

Una vez realizados los experimentos y de aplicar las técnicas de análisis que se han descrito en apartados anteriores, se logró obtener las concentraciones de los iones presentes tanto en las muestras procedentes del permeado como las de la alimentación, lo que permitió el cálculo de los rechazos realizados por la membrana de cerámica de NF.

Los rechazos obtenidos en cada experimento han sido ajustados mediante el SDFM. La modelización se ha realizado aplicando las ecuaciones de SDFM en el programa Excel. A partir de esta modelización se ha podido examinar y estudiar si los resultados sirven para determinar la permeabilidad de la membrana de cada especie iónica, como para predecir el comportamiento de la membrana a la hora de excluir las especies iónicas. Dado que el SDFM es un modelo inicialmente desarrollado para membranas poliméricas planas, el TFG se ha puesto también como objetivo el comprobar la validez del SDFM aplicado en membranas cerámicas tubulares.

Una vez finalizado el análisis y la modelización de los resultados experimentales de este proyecto, se pasará a la comparación de los resultados de los dos casos con los resultados obtenidos con membranas poliméricas procedentes de proyectos de años anteriores.

7.1. Rechazo de 0,01 M de Na_2SO_4 a distintos pHs

Análisis por conductimetría

En estos experimentos se ha analizado, a diferentes niveles de pH, el rechazo del componente dominante y de los iones traza que estaban presentes en la disolución. En este caso, el componente dominante no era otro que la sal de sulfato de sodio (Na_2SO_4), puesto que resultaba ser el componente con más presencia de iones. Por otra parte, el ión traza en este fueron protones (H^+) para los rangos de trabajo con $\text{pH} < 7$, y los aniones de hidróxido (OH^-) para los rangos de trabajo con $\text{pH} > 7$.

El análisis del rechazo se realizó por diferentes métodos. Inicialmente se analizó el rechazo de las muestras mediante el uso del conductímetro. De esta forma, se conseguía una idea inicial sobre el funcionamiento de eliminación de la membrana con la disolución. Como ya se ha comentado, analizar la conductividad no permite determinar la concentración de cada ión y, por lo tanto, determinar el rechazo de cada ión, sino que solo valora la cantidad de iones presentes en una disolución. Por esta razón, se le considera un análisis preliminar. El resultado de este estudio preliminar se puede observar en la siguiente gráfica (Figura 25).

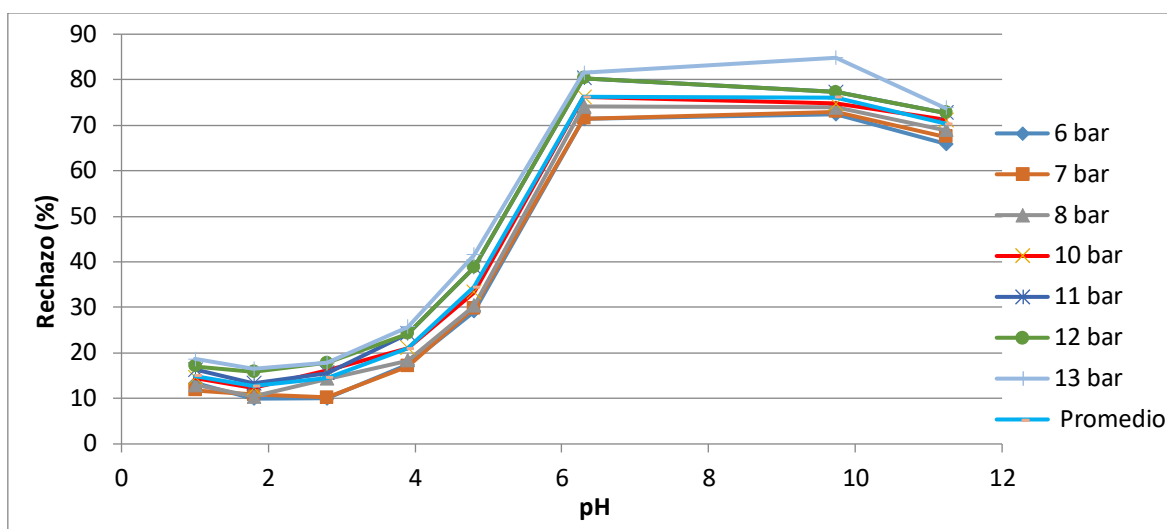


Figura 25. Rechazo de los iones de la disolución en función del pH variando la presión de trabajo²

La gráfica de la Figura 25 muestra los múltiples rechazos obtenidos mediante conductimetría a lo largo de los diferentes pH de trabajo. Se puede observar que, aunque las diferencias son pequeñas, a medida que la presión de entrada va variando el rechazo también lo hace, dando lugar que el aumento de uno produzca la disminución del otro. Tal y como se observa en la ecuación 6.6 la permeabilidad de los iones de una disolución es inversamente proporcional a la presión de transmembrana, de manera que la permeabilidad de los iones a través de la membrana va disminuyendo a medida que aumenta la presión de transmembrana (presión que es directamente proporcional a la presión de entrada(Ec.6.3)).

También se puede percibir que en zonas de trabajo con pH ácido se obtiene un rechazo que no supera el 20%, mientras que en zonas donde el pH es básico se obtiene un rechazo muy superior al 65%. Las hipótesis iniciales indican que este hecho es producido por el cambio de la carga superficial de la membrana. Como se ha comentado en el apartado 4.5.2, se sabe que a pH ácidos la carga es positiva, por lo que la presencia de un rechazo inferior al 30% puede ser producido por los iones de sulfato que son atraídos por la carga de la membrana. Para pH básicos la carga es negativa, la presencia de un rechazo superior al 65% puede ser debido a que los iones de sulfato sean repelidos por tener la misma carga que la membrana. La zona comprendida entre un pH de 4-6, corresponde a la zona de transición de la carga de la membrana, es decir, donde se produce el cambio de carga, hecho que era de esperar puesto que a pH de 5,5 se encuentra el punto

² Ver Anexo B: Gráficas de rechazo obtenidas por conductimetría a cada presión de trabajo.

isoelectrónico de la membrana, tal y como se ha comentado en el apartado 4.2 cuando se describían las membranas de Titania.

Análisis y modelización de los iones dominantes y traza

Una vez analizadas las muestras por cromatografía se puede calcular los rechazos de los iones y proceder a realizar la modelización de su rechazo. La siguiente gráfica presenta el rechazo de los iones del compuesto dominante, la sal de Na_2SO_4 , en función del flujo de transmembrana (J_v) a distintos pH.

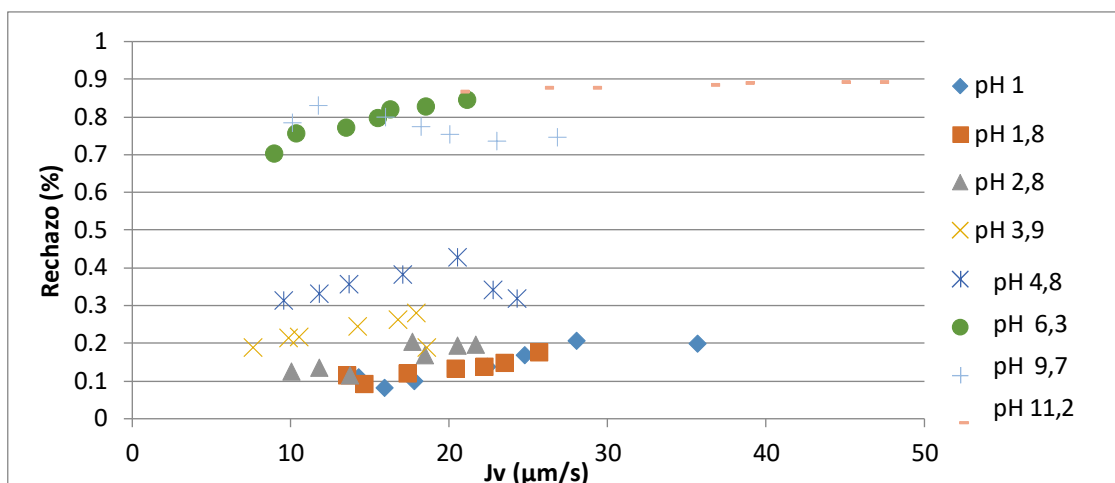


Figura 26. Rechazo de la sal dominante a diferentes pH de trabajo

Al contemplar la Figura 26 se puede percibir que el aumento del pH, empezando en regiones ácidas hasta llegar a las alcalinas, provoca que el rechazo de la sal de Na_2SO_4 se vaya acrecentado. Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por el conductímetro. Además, si se compara la Figura 25 con la Figura 26 se puede comprobar que, en la gran mayoría de los casos, el rechazo calculado por los valores obtenidos por el cromatógrafo y por el conductímetro tienen un resultado similar, excepto para los experimentos de pH 11,2, para el rechazo calculado por los datos obtenidos por cromatografía resultaron ser del 90% en vez del 70%.

A continuación, se mostrarán en las siguientes gráficas el rechazo de los iones del compuesto dominante (Na_2SO_4) y del ión traza (H^+), así como la modelización de cada uno de ellos para cada uno de los pH ácidos con los que se ha trabajado (Figura 27). Los puntos representan el rechazo observado, que es el rechazo basado en la diferencia de concentraciones entre la concentración de la alimentación y el permeado, tanto para los iones del compuesto dominante (RS_{obs}) como para los iones de la traza (Rt_{obs}). Las líneas trazadas indican las simulaciones mediante el modelo SDFM.

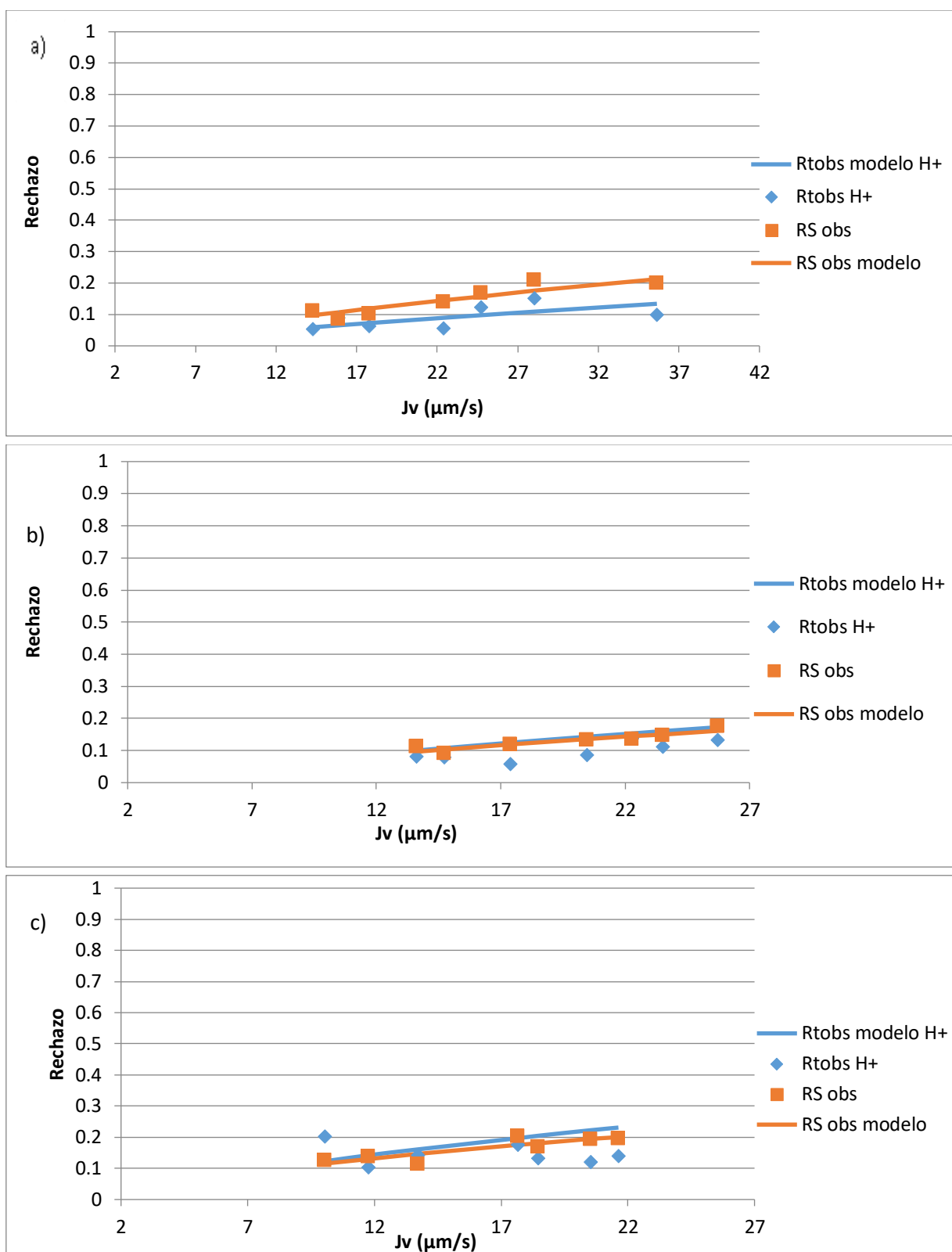


Figura 27. a) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 1
b) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 1,8
c) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 2,8

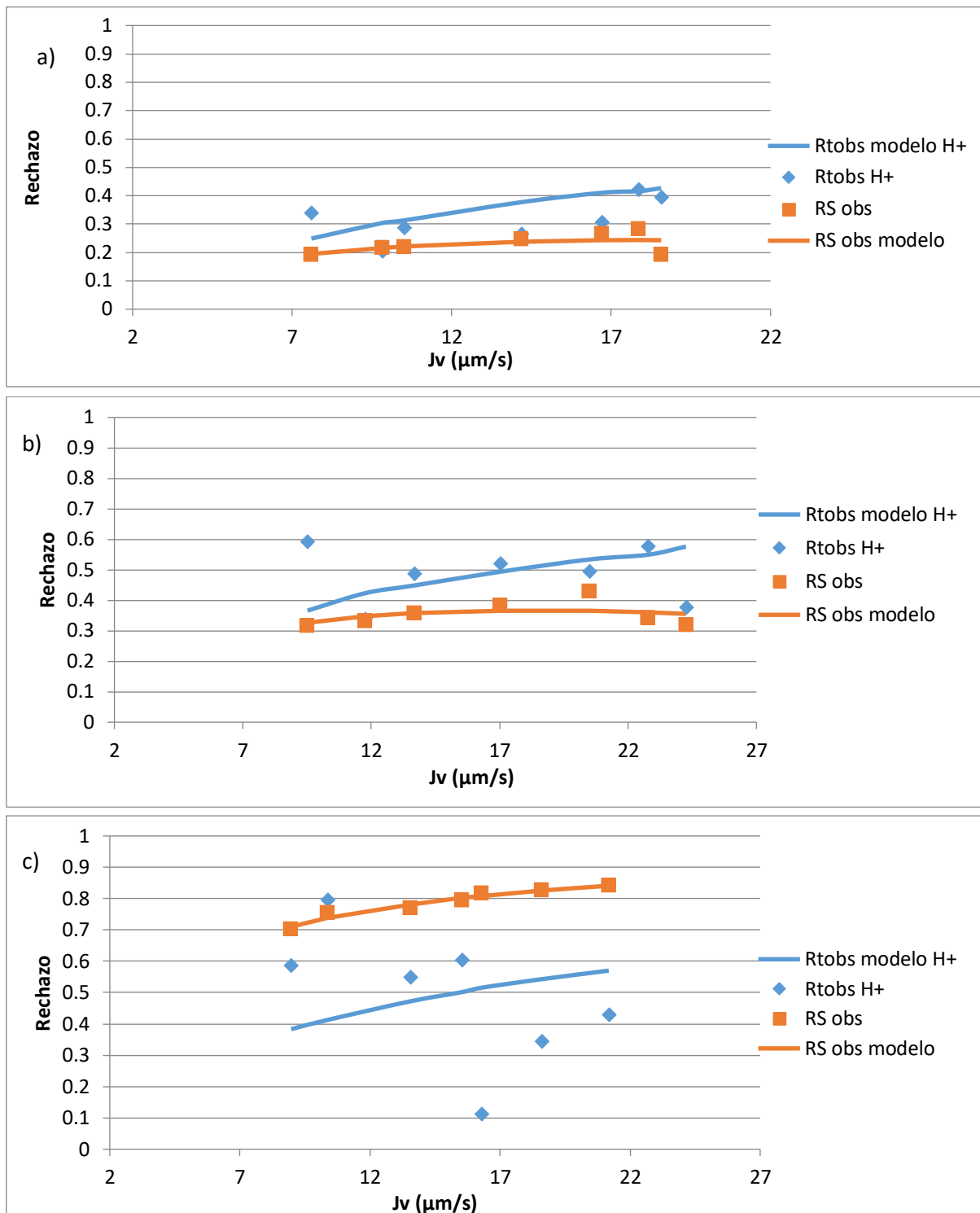
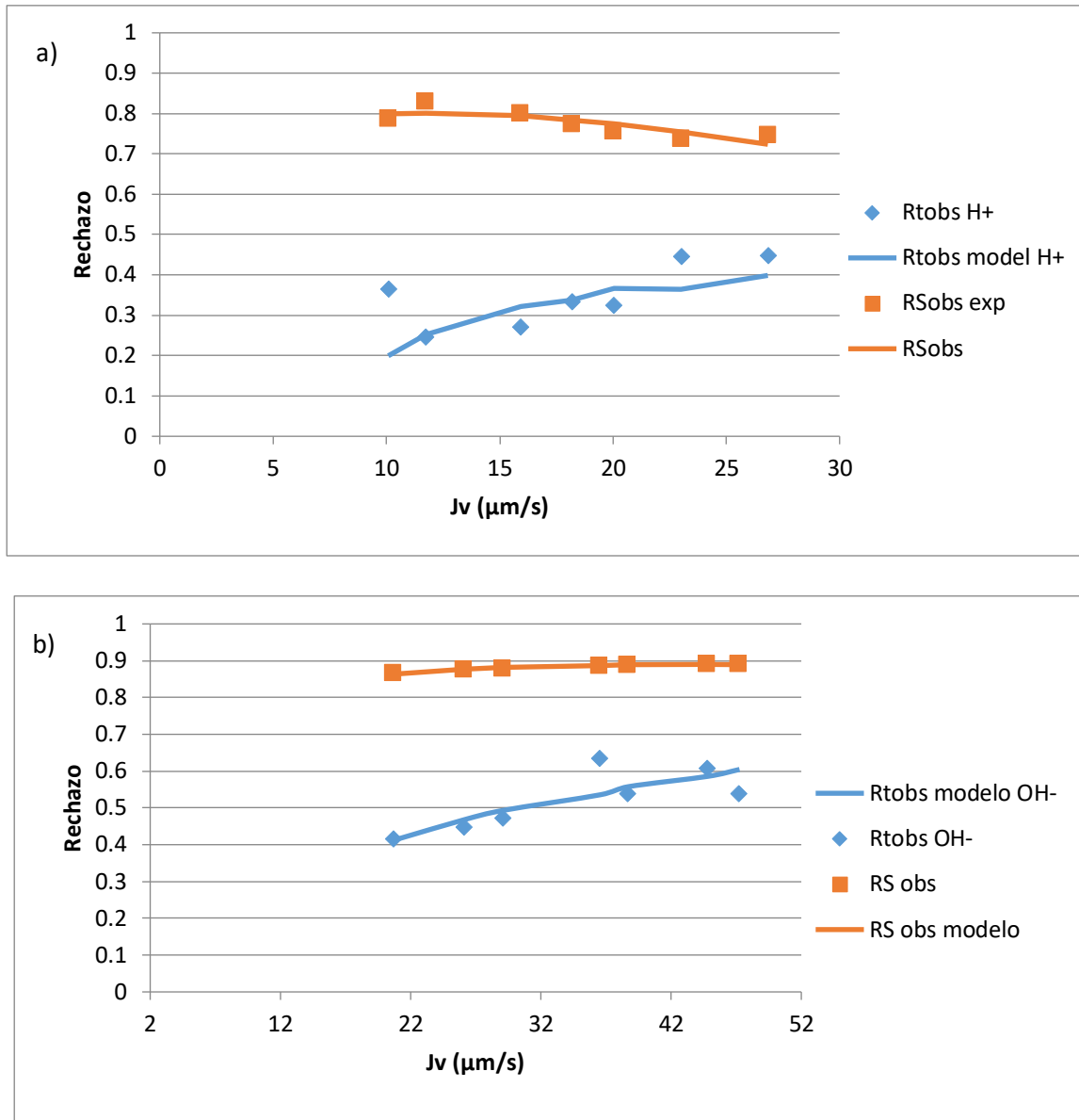


Figura 28. a) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 3,9
 b) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 4,8
 c) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 6,3

Tal y como se ha comentado, cuanto más cerca esté el valor del pH de 0 más permeabilidad tendrá la membrana, provocando un mayor traspaso de los iones del componente dominante e incluso de protones al permeado. Esto se puede ver perfectamente en las diferentes gráficas de las Figuras 27y 28 donde el rechazo de la sal y del ión traza va aumentando a la par que aumenta el pH. Una observación curiosa que se puede percibir es que se ha comentado que la carga de la membrana es positiva a $\text{pH} < 5,5$, pero los resultados muestran que a pH muy ácidos el rechazo de H^+ es mínimo yendo en contra del principio de exclusión de Donnan (si la membrana y el ión tienen la misma carga se repelen). Esta aparente contradicción es debida a que se debe cumplir el principio de electroneutralidad, por el que ninguna corriente, en este caso el del permeado, puede quedar cargada eléctricamente, por lo que para neutralizar la carga negativa producida por los iones de SO_4^{2-} , tanto los iones de Na^+ como de H^+ han de atravesar la membrana, aunque eso implique ir en contra del fenómeno de exclusión de Donnan.

A continuación, se mostrarán en las siguientes gráficas el rechazo de los iones del compuesto dominante (Na_2SO_4) y del ión traza (OH^-), así como la modelización para cada uno de los pH básicos con los que se ha trabajado (Figura 29). Los puntos representan el rechazo observado, que es el rechazo basado en la diferencia de concentraciones entre la concentración de la alimentación y el permeado, tanto para los iones del compuesto dominante ($R_{\text{S obs}}$) como para los iones de la traza (R_{tobs}). Las líneas trazadas indican las simulaciones mediante el modelo SDFM.



**Figura 29. a) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 9,7
b) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 11,2**

Respecto a la eliminación de los iones del componente dominante, se observa el mismo resultado expuesto con anterioridad. El rechazo de los iones de Na^+ y SO_4^{2-} aumenta a medida que aumenta el pH. En este caso el efecto es provocado por la presencia de una carga negativa en la superficie de la membrana (siempre y cuando el $\text{pH} > 5,5$) que repele los iones SO_4^{2-} y de OH^- (exclusión de Donnan), y al mismo tiempo los iones de Na^+ se encargan de neutralizar las cargas de estos iones.

La permeabilidad de la membrana a los diferentes iones determinada por el modelo se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Permeabilidad de la membrana respecto a los diferentes iones

Permeabilidad de la membrana ($\mu\text{m/s}$)					
pH	Ps_Na ₂ SO ₄	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	H ⁺	OH ⁻
1	131	186	83	449	
1,8	121	12120	40	12120	
2,8	69	6964	23	6964	
3,9	20	2068	6	2068	
4,8	11	20	6	27	
6,3	3	4	2	22	
9,7	0	0	0		3
11,2	2	2	2		26

Tal y como se puede apreciar la permeabilidad del ión SO_4^{2-} en la membrana se ajusta a las soluciones explicadas cuando se razonaba los motivos de rechazo en los diferentes pH de trabajo. En definitiva, el efecto del pH sobre la membrana tubular de cerámica afecta de forma considerable en la exclusión de las especies iónicas. A un pH de trabajo inferior al IEP ($\text{pH} < 5,5$), la carga superficial de la membrana cerámica se vuelve positiva debido a la protonación de los grupos hidroxilos ($-\text{TiOH}_2^+$) presentes en la superficie de la membrana. La presencia de esta carga favorece el paso de SO_4^{2-} , y a medida que el pH se va reduciendo la carga se vuelve más fuerte debido a la presencia de más grupos $-\text{TiOH}_2^+$ y en consecuencia se produce un aumento del paso de SO_4^{2-} . Este efecto descrito se puede observar tanto en la Tabla 7 como a lo largo de los gráficos expuestos con anterioridad. La diferencia entre los valores de SO_4^{2-} en los pH de 1, 1,8 y 2,8 es debida a la presencia del ión hidrógeno sulfato (HSO_4^-). La presencia del ión hidrogeno sulfato se debe a las siguientes reacciones de disociación del ácido sulfúrico:



La primera reacción de la disociación es completa, mientras que la segunda reacción tiene un $\text{pK}=1,92$. Esto quiere decir que a un $\text{pH}=1,92$ las concentraciones de los iones de HSO_4^- y SO_4^{2-} serán

iguales. A pH inferiores habrá más concentración de HSO_4^- y a pH superiores habrá más de SO_4^{2-} . Este fenómeno se puede observar en la Figura 30.

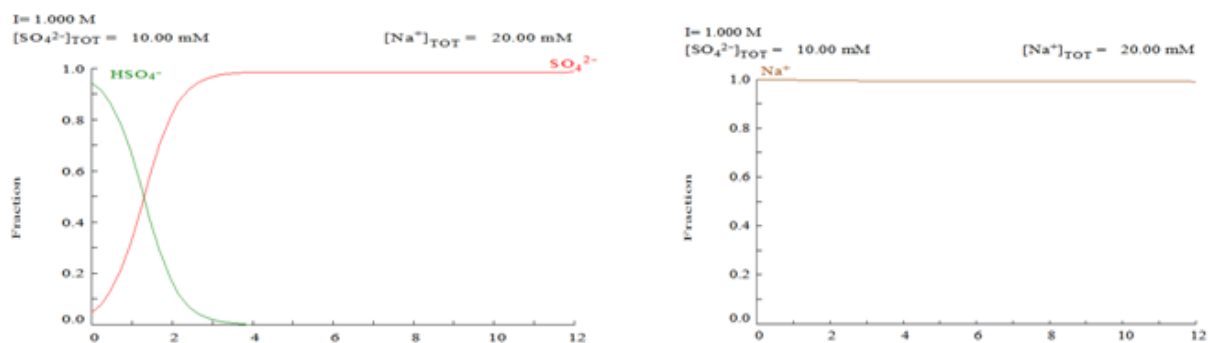


Figura 30. Fracción de predominancia de las especies químicas en la alimentación a diferentes pH de trabajo

La especie HSO_4^- predomina sobre la especie SO_4^{2-} $\text{pH} < 2,8$. Dado que el HSO_4^- ve menos impedido su flujo a través de la membrana por efecto de la exclusión dieléctrica que el SO_4^{2-} (en otras palabras, la permeabilidad de la membrana hacia el HSO_4^- es superior que el SO_4^{2-}), operar a $\text{pH} < 2,8$ resulta una disminución del rechazo del azufre (S) total, puesto que, como se ha dicho, éste se encuentra mayoritariamente en forma de HSO_4^- . Este incremento de la permeabilidad del sulfato puede observarse claramente en los resultados de la Tabla 7, donde se observa que a pH 2,8 sulfato como SO_4^{2-}) la permeabilidad tiene un valor de $23 \mu\text{m/s}$, mientras que a una unidad de pH inferior su valor se dispara a valores $40 \mu\text{m/s}$. A su vez, el traspaso de iones de Na^+ aumenta por la presencia de iones HSO_4^- en el permeado (para cumplir el efecto de la electroneutralidad) e incluso iones de H^+ .

Por el contrario, a un pH de trabajo superior al IEP ($\text{pH} > 5,5$), la carga superficial de la membrana cerámica se vuelve negativa debido a la desprotonación de los grupos hidroxilos ($-\text{TiO}^-$) presentes en la superficie de la membrana. La presencia de esta carga no favorece el paso del ión SO_4^{2-} (especie de S mayoritaria a estos pHs), y a medida que el pH va incrementando la carga se vuelve más fuerte debido a la aparición de más grupos $-\text{TiO}^-$. En consecuencia los iones SO_4^{2-} y OH^- son repelidos de la membrana por la exclusión de Donnan. Además, para evitar que haya un exceso de carga en el concentrado una gran parte de Na^+ son también excluidos. Este cambio de carga superficial en la membrana también se observa en los valores de la permeabilidad del Na_2SO_4 , donde la permeabilidad de membrana a la sal cae de valores de $131 \mu\text{m/s}$ a valores de $2 \mu\text{m/s}$ cuando se aumenta el pH de 1 a 11.2."

Aunque la representación gráfica del modelo que se estudia se ajustó a los valores experimentales del rechazo observado, y que los valores de la permeabilidad de la membrana respecto del ión SO_4^{2-} y de la sal de Na_2SO_4 se van reduciendo a medida que aumenta el pH, cosa que se ha podido contemplar a lo largo de las diferentes gráficas de este apartado, se puede concluir que para estos experimentos el SDFM no se ha podido validar para esta membrana de Titania. El motivo es por los

resultados obtenidos de las permeabilidades de membrana, tanto de Na^+ como de H^+ . A pH de 1,8, 2,8 y 3,9 sus permeabilidades deberían ser superiores a las del ión SO_4^{2-} , cosa que lo son, pero su diferencia es más del doble, incluso llegan a superar de manera exagerada las de la sal de Na_2SO_4 y de su propio ión a un pH más bajo. Además, aun pH de 11,2 la permeabilidad de la sal de Na_2SO_4 y del ión SO_4^{2-} debería ser inferior al obtenido a un pH de 9,7 ya que como se ha visto en este pH se ha obtenido el mayor rechazo de la sal.

7.2. Rechazo de iones en disoluciones de Na_2SO_4 con iones metálicos

Una vez analizados las muestras por cromatografía y absorción atómica se puede calcular los rechazos de los iones y proceder a realizar su modelización. A continuación se mostrarán en las siguientes gráficas el rechazo de los iones del compuesto dominante (Na_2SO_4) y de los iones traza (H^+ , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+}), así como la modelización de cada uno de los diferentes iones en función del flujo de transmembrana para cada uno de los pH ácidos con los que se ha trabajado (Figuras 31 y 32). Los puntos representan el rechazo observado, que es el rechazo basado en la diferencia de concentraciones entre la concentración de la alimentación y el permeado, tanto para los iones del compuesto dominante (RS obs) como para los iones de la traza (Rtobs). Las líneas trazadas indican las simulaciones mediante el modelo SDFM.

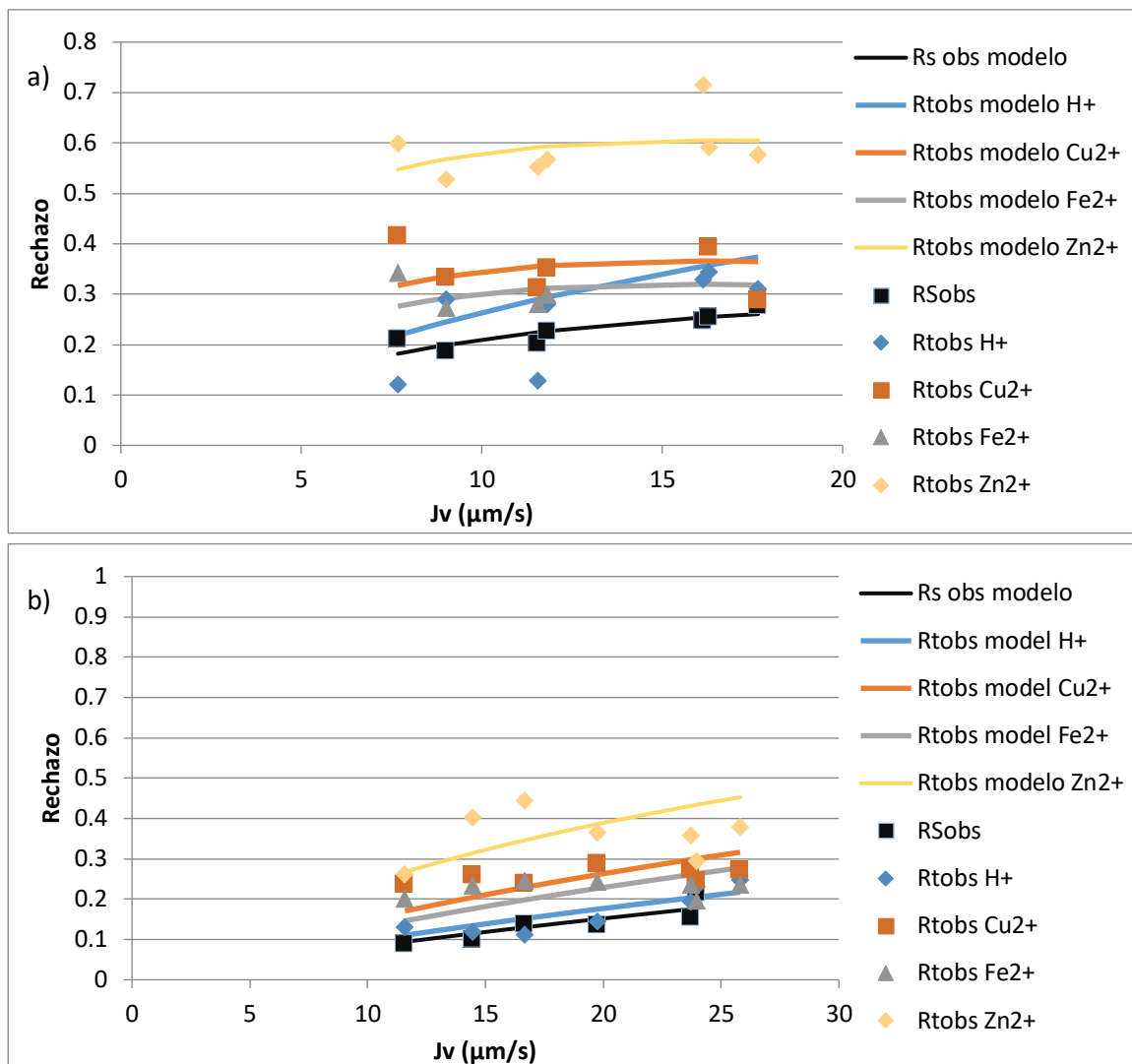


Figura 31. a) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 2,8
b) Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 1,8

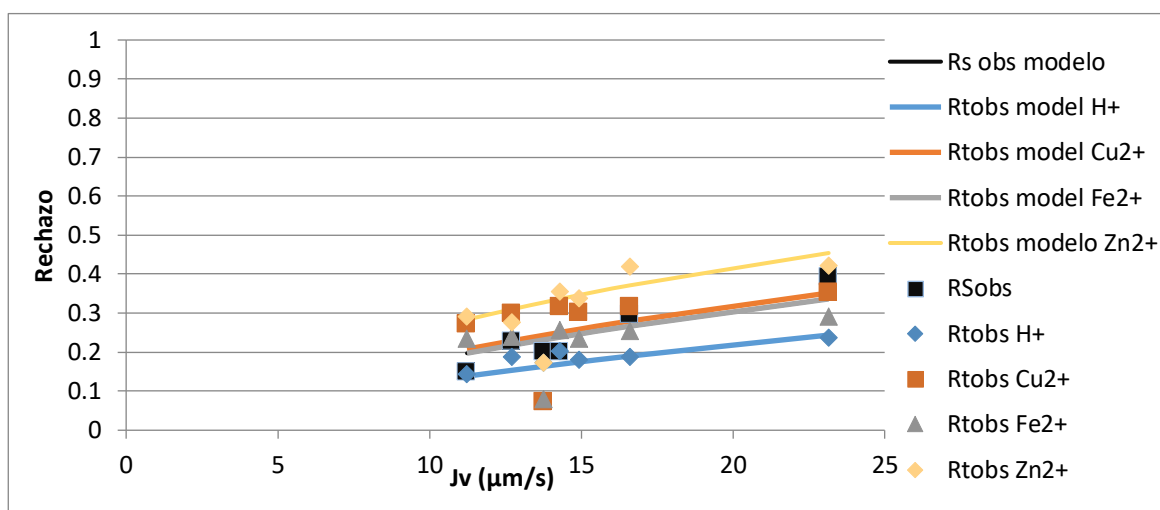


Figura 32. Rechazo y modelización de las diferentes especies iónicas a pH 1,4

Al contemplar las gráficas procedentes de las Figuras 31 y 32 se puede observar que el rechazo experimental de las especies decrece a medida que el pH de trabajo se va aproximando a 0. En todos los casos, se observa que el rechazo de los iones metálicos tienden a ser superiores al rechazo de la sal, esto puede apreciarse en la Figura 31 a) que con un pH 2,8 el rechazo de la sal no llega a superar el 30%, mientras que el rechazo de los iones metálicos superan el este 30% llegando incluso a tener un rechazo de un 60% como es en el caso del ión Zn^{2+} . En la Figura 32, como se puede apreciar se trabaja con un pH 1,4 y el rechazo de la sal y de los iones metálicos se han reducido, tanto es así que en ocasiones los iones metálicos y la sal han dado lugar a un rechazo idéntico ($R \sim 25\%$).

Como se puede observar el modelo se ajusta a los rechazos observados de los iones de la sal dominante y de los iones traza. Como ya se ha comentado en la mayoría de los casos, el rechazo de los iones de la sal dominante es mucho menor que el de las sales, excepto a pH 1,4. El motivo de este rechazo puede ser debido a que a pH bajos la carga de la membrana es positiva y se produce la exclusión de Donnan con los iones positivos. Para ello se considera la fracción de predominancia del Fe^{2+} en la disolución de la alimentación, mostrada en la Figura 33. Para el caso de pH 1,4, la reducción del rechazo de los iones metálicos puede explicarse por el hecho de que a este pH predomina HSO_4^- , que permea con más facilidad a través de la membrana que el SO_4^{2-} , atrayendo hacia él cationes metálicos, que atraviesan la membrana para cumplir el principio de electroneutralidad. Hay que tener en cuenta que no todos los cationes metálicos se encuentran solamente como iones libres (por ejemplo, el Fe^{2+} se presenta en la disolución en forma de FeHSO_4^+ , que presenta una sola carga), por lo que la resistencia a permear a través de la membrana por el efecto de exclusión de Donnan y de exclusión eléctrica se ve reducida.

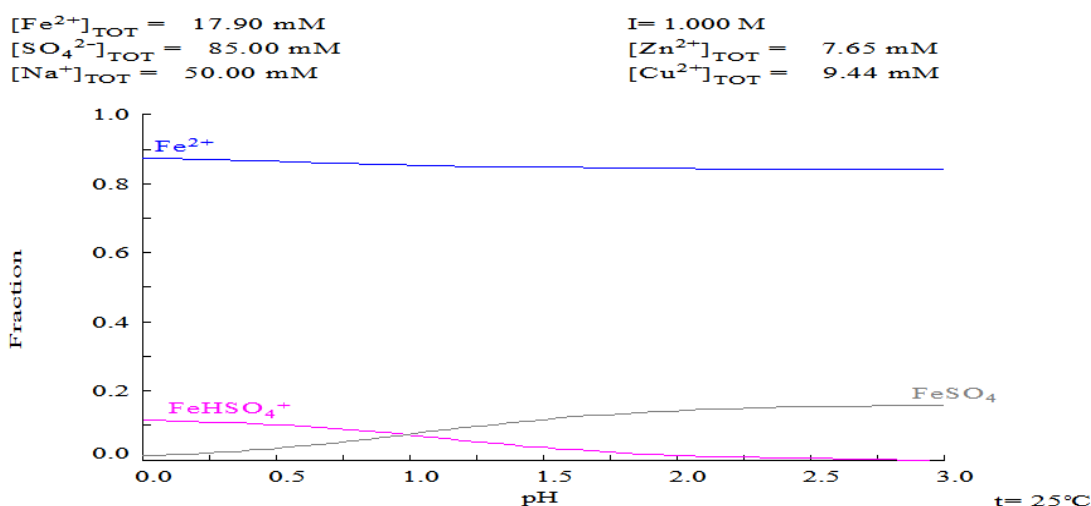


Figura 33. Fracción de predominancia del Fe^{2+} en la alimentación a diferentes pH de trabajo

La siguiente gráfica muestra el rechazo de los iones de la disolución a pH 0,8.

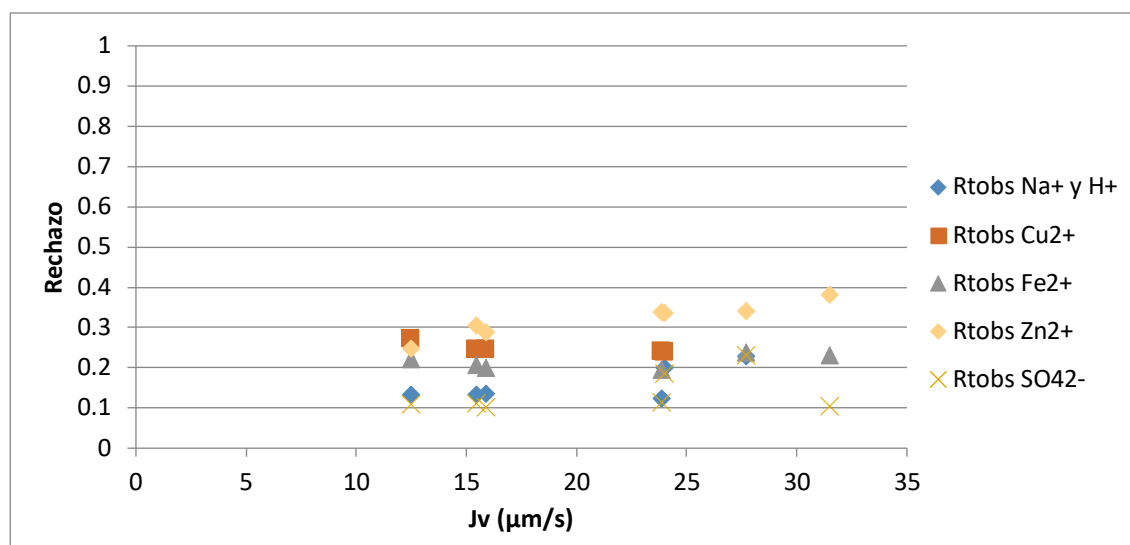


Figura 34. Rechazo de las especies iónicas a pH 0,8

A un pH de 0,8 las concentraciones de H^+ y de Na^+ resultaron ser prácticamente idénticas. Este hecho imposibilitó la realización de la modelización por la presencia de dos componentes dominantes. Así que la Figura 34 muestra únicamente el rechazo observado de cada especie iónica. Como muestra la gráfica, el rechazo de los metales sigue siendo superior al de los iones de H^+ , Na^+ y de SO_4^{2-} , posiblemente siendo repelidos por la carga de la membrana. Aun así, no se obtiene un rechazo superior al 30%, debido al paso de una gran parte de éstos para cumplir el principio de electroneutralidad.

La permeabilidad de la membrana a los diferentes iones se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Permeabilidad de la membrana en los diferentes iones de la disolución

Permeabilidad de la membrana ($\mu m/s$)							
pH	Ps_ Na ₂ SO ₄	H ⁺	SO ₄ ²⁻	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Na ⁺
2,8	25	169	9	15	22	4	169
1,8	45	139	19	71	89	35	138
1,4	111	99	93	87	99	55	99

Tal y como se puede apreciar las permeabilidades de la membrana se ajustan a las soluciones explicadas cuando se razonaba los motivos de rechazo en los diferentes pH de trabajo. En

definitiva, el efecto del pH sobre la membrana de cerámica vuelve a ser un factor importante en el rechazo de los iones de la sal dominante y en los iones traza. Este suceso se percibe con las permeancias del ión de SO_4^{2-} , puesto que, al tener una carga positiva en la membrana, producida por la presencia de los grupos $-\text{TiOH}_2^+$ en la superficie de ésta, los iones de SO_4^{2-} son atraídos. Este efecto de atracción va aumentando a medida que el pH va disminuyendo y vaya aumentando los grupos $-\text{TiOH}_2^+$.

Pero el efecto del pH no solo se verá únicamente en la presencia de más grupos hidroxilo protonados en la superficie de la membrana, sino que se verá también en el aumento de la permeancia del ión de SO_4^{2-} , puesto que la disminución del pH por debajo del 2,8 provoca la aparición de los iones de HSO_4^- , paso del cual será favorecido por el efecto de la exclusión dieléctrica. El aumento de la permeabilidad de la membrana al sulfato debido a la presencia de los iones de HSO_4^- se observa claramente en la Tabla 8, donde a pH 2.8 (sulfato como SO_4^{2-}) la permeabilidad tiene un valor de 9 $\mu\text{m/s}$, mientras que a una unidad de pH inferior su valor se dispara a valores 93 $\mu\text{m/s}$. Como resultado la permeabilidad en la membrana de los iones de Na^+ y los iones metálicos aumentará.

La presencia de iones con carga positiva, también puede afectar de forma significativa al rechazo. El primer suceso se puede contemplar cuando el rechazo de los iones SO_4^{2-} disminuye el rechazo de los metales a pesar de la presencia de una carga positiva en la membrana, esto ocurre para, de nuevo, cumplir con el principio de electroneutralidad, tal y como se observa en la Tabla 8 a pH 1,4, donde la permeabilidad de la sal y de los iones metálicos rondan sobre valores cercanos a los 90 $\mu\text{m/s}$. También se puede producir un efecto de exclusión dieléctrica esta vez por los cationes. Si se examina la Tabla 8 a pH 2.8 y 1,8 se percibe un mayor rechazo de los metales respecto al rechazo de los iones monovalentes, como lo son el ión de H^+ y Na^+ . Este efecto de exclusión también se puede percibir en la reducción del rechazo de los cationes metálicos del hierro a medida que se reduce el pH. La presencia de más iones de Fe^{2+} puede ser debida a la formación del ión FeHSO_4^+ en la alimentación y por efecto de exclusión dieléctrica su permeabilidad a través de la membrana aumenta. Un último efecto que se puede producir es el de la exclusión de Donnan, como se observa en la Tabla 8 a pH de 2,8 y 1,8 el rechazo de los metales es mucho más alto que el de los iones de Na^+ y H^+ , esto es debido a que una carga divalente se repele con más facilidad que una carga monovalente.

En conclusión, el modelo obtuvo unos valores de permeabilidades de la membrana para cada ión bastante razonables para los diferentes pH de trabajo, y los modelos gráficos pueden utilizarse para predecir el comportamiento de rechazo de los iones a cualquier pH de trabajo. Pero la existencia de una serie de discordancias entre los valores obtenidos en las permeabilidades de la Tabla 8 y los gráficos de la Figura 31 y la Figura 32 cuestionan la validez del modelo SDFM utilizado. Este hecho no permite validar el SDFM para la membrana de Titania. Según los modelos de los gráficos (Figura 31 y

Figura 32), la discriminación de la sal es superior a un pH de 1,4 que de 1,8 cosa que no puede ser cierta según lo explicado y observado en las permeabilidades de Na_2SO_4 . A pH 1,8 la cantidad permeada de los metales tiende a ser superior a la cantidad permeada de las sales, teniendo en cuenta que hay más rechazo de los iones metálicos que de las sales. Por otra parte, a pH 2,8 la permeabilidad de la sal y de los cationes de Fe^{2+} y Cu^{2+} son cercanos, cuando gráficamente a un pH de 2,8 debería existir una mayor diferenciación de valores entre estos tres resultados.

7.3. Comparación de resultados de membranas cerámicas con membranas poliméricas

En este apartado se compararán los resultados que se obtuvieron en los experimentos de los diferentes casos, con resultados que se obtuvieron en años anteriores.

7.3.1. Comparación de los rechazos de Na_2SO_4

Los resultados escogidos a comparar provienen del proyecto " *Eliminació d'àcid sulfúric mitjançant membranes de nanofiltració: Efecte del pH i la concentració*" [Arriola Simón, Carles]. En este proyecto se estudiaba el rechazo de una disolución que se asemejara a las AAM mediante el uso de membranas poliméricas planas de NF.

Las membranas usadas para este proyecto fueron las membranas NF-270, Hydracore 70pHT y la membrana ESNA. Para este proyecto se usó una disolución de Na_2SO_4 a 0,1M a la que se le iba variando el pH.

Análisis de resultados a un pH de 2,8

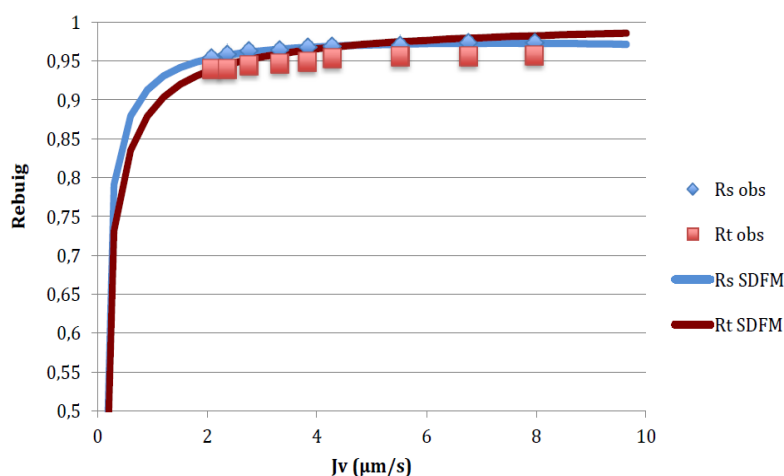


Figura 35. Rechazo y modelización en la membrana Hydracore 70pHT [Fuente: Arriola, 2015]

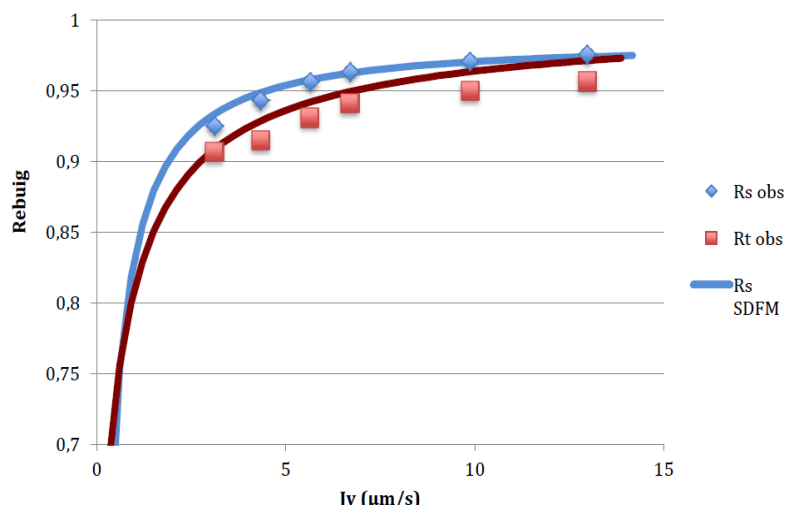


Figura 36. Rechazo y modelización en la membrana ESNA [Fuente: Arriola, 2015]

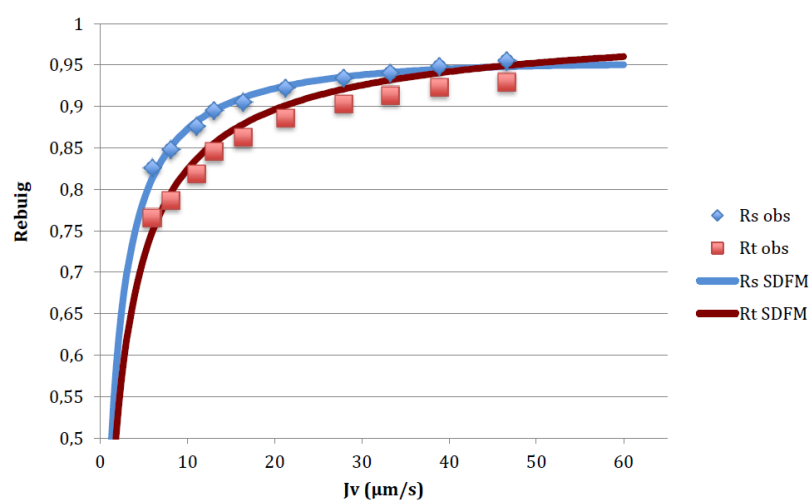


Figura 37. Rechazo y modelización en la membrana NF-270[Fuente: Arriola, 2015]

En las tres gráficas se puede observar como el rechazo observado de la sal dominante y el ajuste realizado por el SDFM se ajustan perfectamente. En cuanto rechazo al ión traza, en todas gráficas suele estar ligeramente por debajo del ajuste del modelo. Este hecho se remarca en el caso de la membrana Hydracore donde los valores de rechazo a valores altos del flujo de transmembrana presentan una mayor diferencia. A pesar de esto, la diferencia no es más del 3% por lo que el modelo y los rechazos concuerdan perfectamente.

En cuanto a la gráfica de este proyecto (Figura 31 apartado a)) el ajuste realizado por el SDFM no se puede considerar perfecto como en las membranas poliméricas. El motivo es producido por la dispersión de los valores de los experimentos, sobretodo del ion traza, producidas por errores a la hora de preparar las muestras para a analizar o fallos en el equipo de análisis.

Otro suceso a comentar es que estas membranas poliméricas obtienen un rechazo muy superior al 85%, valor alcanzado por la membrana cerámica solamente a $\text{pH} > 6,3$, con lo que se deduce que para la obtención de un permeado libre de iones de sulfatos se debe trabajar con membranas poliméricas, en especial la membrana de Hydracore.

Análisis de resultados a un pH de 1,8

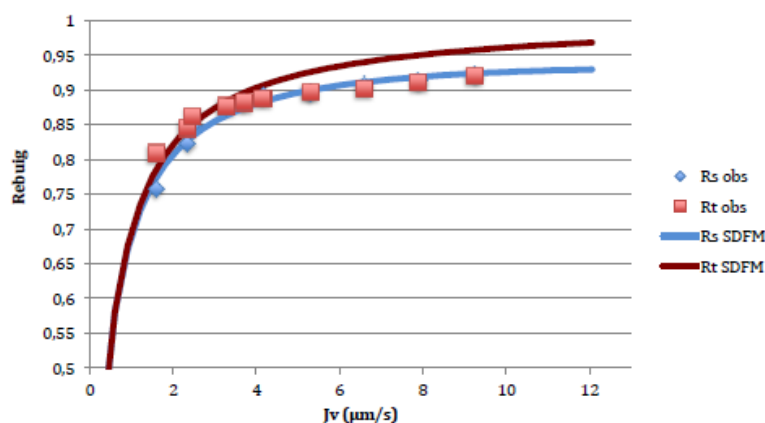


Figura 38. Rechazo y modelización en la membrana Hydracore[Fuente: Arriola, 2015]

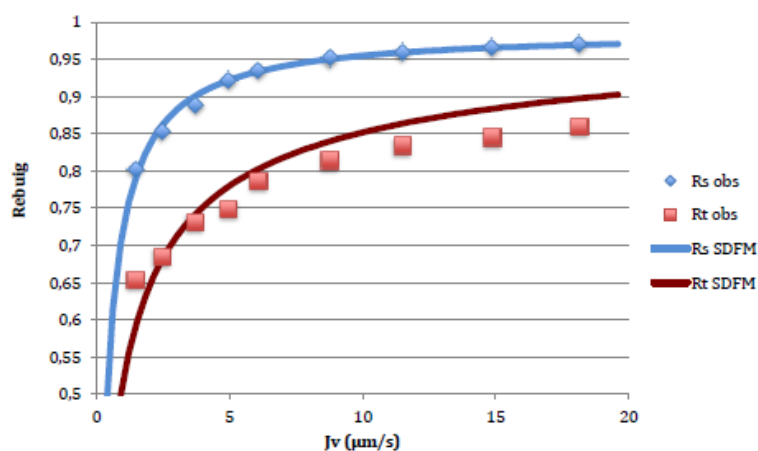


Figura 39. Rechazo y modelización en la membrana ESNA [Fuente: Arriola, 2015]

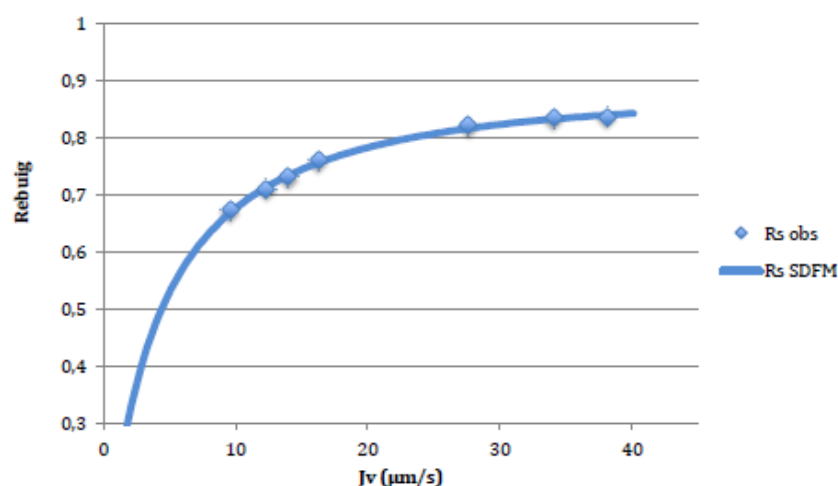


Figura 40. Rechazo y modelización en la membrana NF-270 [Fuente: Arriola, 2015]

En estas tres membranas, al igual que con un pH 2,8 hay una coincidencia casi perfecta del modelo con los valores experimentales de la sal dominante. En cambio, el ajuste de los datos proporcionados por los iones traza con el modelo son menos precisos en las membranas de Hydracore y ESNA. Los datos del ión traza en la membrana NF-270 no se representaron debido a la incoherencia de sus resultados.

Para la membrana de Titania a pH 1,8 el modelo se ajusta perfectamente a los valores experimentales (Figura 31 apartado b)) aunque se vuelve a observar un mayor rechazo ($R > 90\%$) es la de ESNA, mientras que la que proporciona un rechazo menor ($R < 20\%$) es la cerámica utilizada en este estudio. Pero aun habiendo obtenido tan buen rechazo las membranas poliméricas respecto a la cerámica, al comparar sus rechazos en los diferentes pH se observa una disminución del rechazo en el pH 1,8 respecto a pH 2,8. La causa es producida por los mismos factores que afectaban a la membrana cerámica de nuestro proyecto al trabajar a pH cercanos a 1:

- El efecto del pH afecta a la carga de la membrana, puesto que la membrana adquiere carga positiva en pH menores al IEP.
- Al reducir el pH y acercarlo a valores de 1 aumenta la presencia y la permeabilidad de HSO_4^- .

Aunque el ajuste del modelo del ión traza con las membranas de Hydracore y ESNA no sea exacto, en general se puede concluir que se ha producido un buen ajuste del SDFM.

Análisis de resultados de la permeabilidad en las diferentes membranas

Tabla 9. Comparación de lapermeabilidad en las diferentes membranas

Membrana	Permeabilidad de la membrana ($\mu\text{m/s}$)			
	pH	Na^+	SO_4^{2-}	H^+
Titania	2,8	6964	23	6964
NF-270	2,8	5	<1	1247
ESNA	2,8	1	<1	192
Hydrocore	2,8	<1	<1	76
Titania	1,8	12120	40	12120
ESNA	1,8	<1	<1	374
Hydrocore	1,8	14	<1	419
NF-270	1,8	---	---	---

Como ya se comentó, los datos generados de la permeabilidad en la membrana de Titania no fueron aceptados debido a la cantidad de Na^+ y H^+ . Al no poderse representar los datos del ión traza de la membrana NF-270 a un pH 1,8 no se pudieron obtener datos de sus permeabilidades.

Tal y como muestra la Tabla 9, la membrana con el mayor rechazo a pH 2,8 es la membrana polimérica Hydrocore con una permeabilidad próxima a 0 $\mu\text{m/s}$ sobre los iones que componen la sal (Na^+ y SO_4^{2-}) y para un pH de 1,8 es la membrana de ESNA, con una permeabilidad próxima a 0 $\mu\text{m/s}$ sobre los iones que componen la sal (Na^+ y SO_4^{2-}), mientras que para los diferentes pH de trabajo la membrana con peor rechazo de todos los iones resulto ser la membrana de Titania. Con los datos de la Tabla 9 se deduce que los datos obtenidos tanto para obtener las permeabilidades, como los datos obtenidos para graficar el modelo de predicción de los rechazos concuerdan perfectamente. En definitiva, en ambos casos se ha concluido que las mejores membranas eran las mismas.

7.3.2. Comparación de los resultados de disoluciones de Na_2SO_4 con iones metálicos

Los resultados escogidos a comparar provienen del proyecto "Separación y recuperación de ácido sulfúrico en aguas ácidas de minas mediante Nanofiltración" [Galindo Ramos, Manuel]. En este proyecto se estudiaba el rechazo de una disolución que se asemejara a las aguas ácidas de minas mediante el uso de membranas poliméricas en espiral de NF.

Las membranas usadas para este proyecto fueron las membranas NF-270 y Hydracore 70pHT. Para este proyecto se usó una disolución con múltiples componentes (Na_2SO_4 a 0,1M, Fe^{2+} 1g/L, Cu^{2+} a 0,6g/L y Zn^{2+} a 0,5 g/L) a la que se le iba variando el pH.

Análisis de resultados a un pH de 2,8

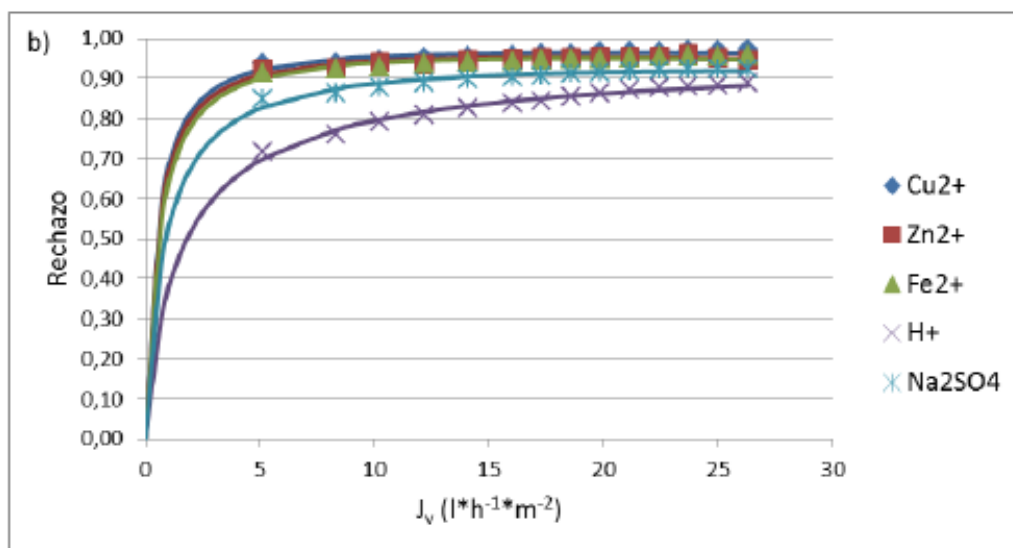


Figura 41. Rechazo y modelización en la membrana NF-270[Fuente: Galindo, 2015]

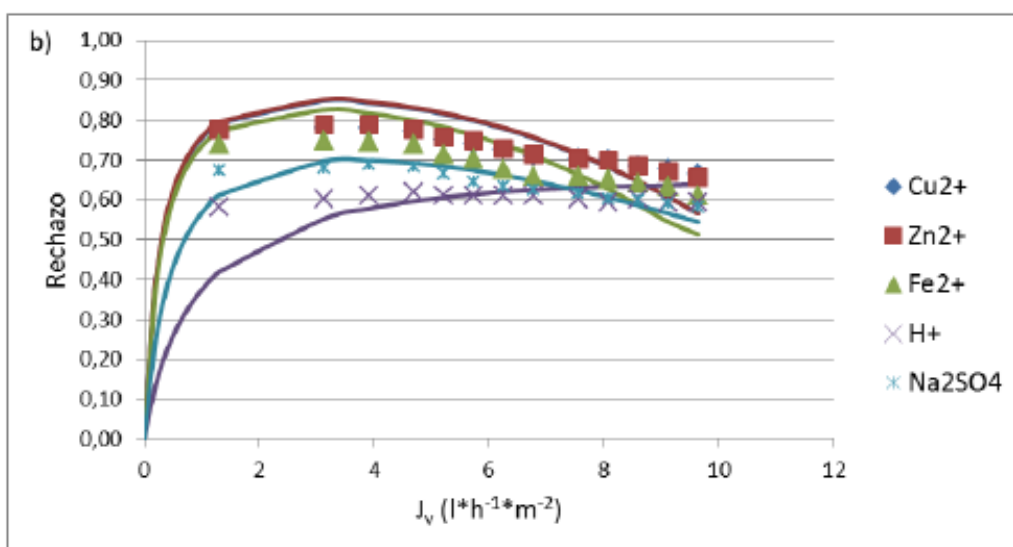


Figura 42. Rechazo y modelización en la membrana Hydracore[Fuente: Galindo, 2015]

En la gráfica de la Figura 41 se puede observar que tanto el rechazo observado de la sal dominante como los rechazos observados de los iones traza se ajustan perfectamente al SDFM. En cuanto a las gráficas de la Figura 42 y de la Figura 31 apartado a) los ajustes del modelo no se les pueden considerar perfectos, ya que en ambos casos los modelos intentan aproximarse a los rechazos obtenidos, pero siempre quedan por encima de los rechazos o no pueden ajustarse perfectamente debido a la dispersión de puntos.

Otro suceso a comentar es que estas membranas poliméricas vuelven a obtener un rechazo muy superior al obtenido con la membrana cerámica. En todos los casos de estudio la sal dominante (Na_2SO_4) vuelve a ser la menos rechazada y los iones traza vuelven a ser los más rechazados, especialmente los metálicos. De todas las membranas, la que consigue un rechazo superiores la membrana de NF-270, que consigue rechazar más del 90% de las especies metálicas presentes. Por el contrario, la membrana que consigue un menor rechazo de las especies metálicas es la membrana de Titania, que solo consigue rechazar un 40% de los iones de hierro y cobre y un 60% de zinc.

Análisis de resultados a un pH de 2,1

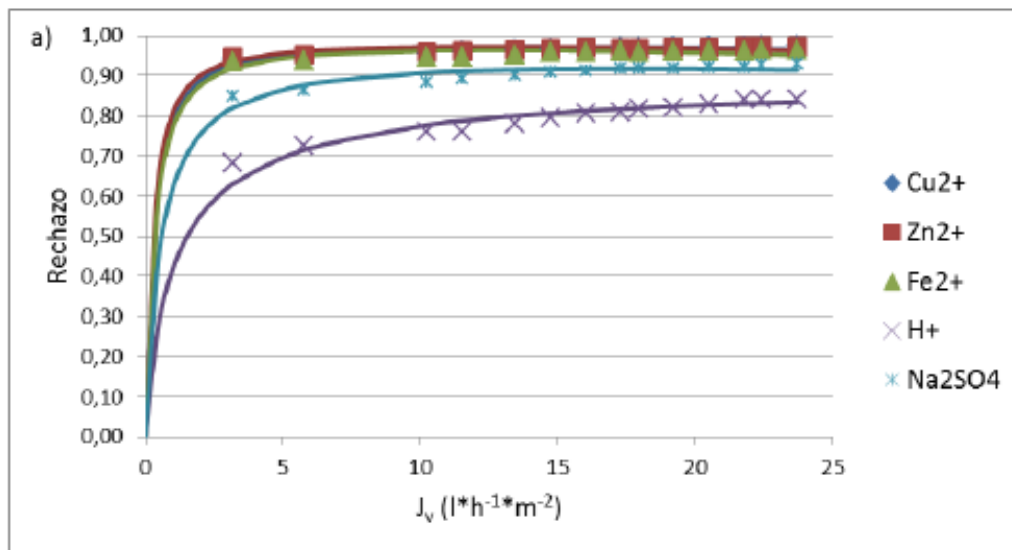


Figura 43. Rechazo y modelización en la membrana NF-270[Fuente: Galindo, 2015]

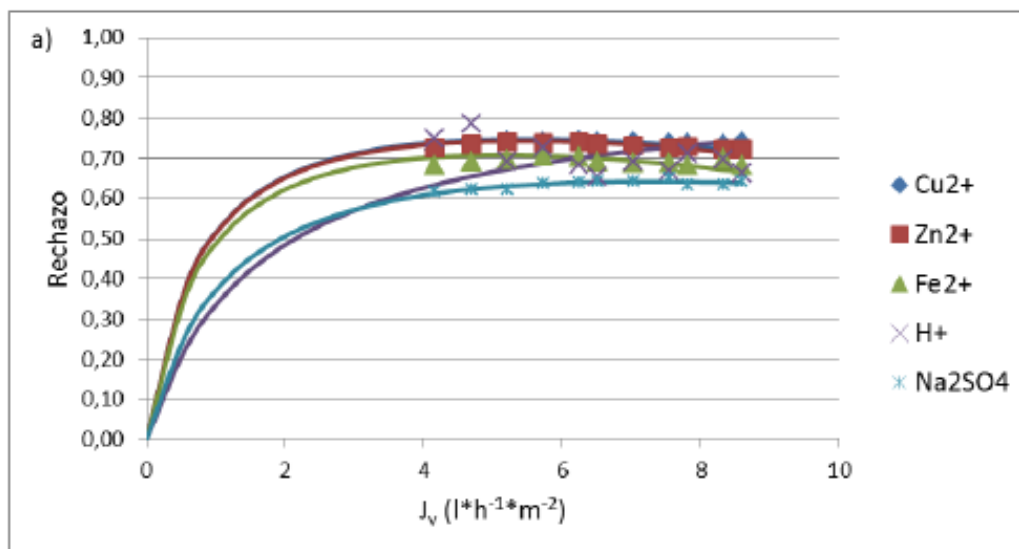


Figura 44. Rechazo y modelización en la membrana Hydracore [Fuente: Galindo, 2015]

En este proyecto no se trabajó con un pH de 2,1 motivo por el cual su comparación no puede ser realizada por falta de datos. Pero aun así su presencia nos permite comparar con los datos obtenidos a pH 2,8 y extraer conclusiones.

Al contemplar los rechazos de las membranas a pH 2,1 y comprarlos con los rechazos obtenidos a pH 2,8 se observa una pequeña disminución de todos los rechazos, especialmente el de la sal. Esto significa que los fenómenos comentados cuando se discutían los rechazos de metales en la membrana de Titania (efecto de la presencia de HSO_4^- , efecto del pH en la carga de la membrana, aumento en el rechazo de divalentes por exclusión dieléctrica...) ocurren del mismo modo que con las membranas poliméricas, independientemente del tipo de módulo en el que se trabaje (tubular, plana, espiral...). Como se puede apreciar la verdadera diferencia se encuentra en el rechazo que se obtiene cuando trabajan en las mismas condiciones de pH, porque a todas las membranas les afectan los mismos factores en la permeabilidad.

8. Impacto ambiental

Este apartado se centrará en el análisis del impacto que este proyecto puede provocar sobre el medio ambiente. El sistema de estudio es únicamente al procedente de la planta piloto durante la realización de los experimentos, puesto que la planta fue construida antes de la realización del proyecto.

El concepto impacto ambiental hace referencia a las consecuencias que un fenómeno natural o un fenómeno causado por la actividad humana producen sobre el medio ambiente. Generalmente, el impacto ambiental está más relacionado con la actividad humana y sus acciones siempre provocan efectos colaterales en éste. En este caso, el objetivo de la evaluación es identificar las alteraciones generadas durante la realización de los experimentos para eliminar o reducir las consecuencias.

En primer lugar, se debe localizar los aspectos que pueden afectar al medio ambiente (Tabla 10).

Tabla 10. Aspectos relevantes en el impacto ambiental

Aspectos	Descripción
Emisiones.	Sustancias gaseosas que pueden ser depositadas al medio ambiente.
Contaminación acústica.	Sonidos y vibraciones producidos por el equipo.
Consumo de recursos.	Consumo de electricidad, petróleo y agua.
Generación de productos y subproductos.	Productos químicos generados en la planta y que no son administrados correctamente.

De todos los aspectos descritos los más importantes son los producidos por la contaminación acústica y la mala administración de los productos generados. La utilización de la bomba genera una gran cantidad de ruido y vibraciones, que, aunque a escala de laboratorio no puede parecer muy significativo, a nivel industrial tiene una gran relevancia, puesto que jugaría un papel importante para elegir su ubicación en la planta industrial. Asimismo, la contaminación del agua debida a una mala gestión de los productos químicos residuales afecta tanto a nivel de planta de laboratorio como industrial, dando a lugar un impacto negativo. Su tratamiento debería ser realizado mediante una clasificación de los residuos generados, en función de si son residuos peligrosos (combustibles o no,

explosivos, gases, residuos biológicos, o residuos radiactivos) o no, informando sobre su peligrosidad (fichas de seguridad ³) para que posteriormente designar a un grupo de personas responsables y expertos en el tratamiento de residuos para que apliquen el método adecuado (incineración, recuperación, reutilización) para su eliminación, neutralización o recuperación.

Para finalizar, también se puede producir un aspecto socio-económico, aunque este impacto está más relacionado a nivel de planta industrial. Normalmente este aspecto representa un impacto positivo, debido a la generación de empleo, la expansión económica y la explotación de una tecnología que va en aumento.

³ Ver Anexo C: Fichas de seguridad de los reactivos utilizados en el proyecto

Conclusiones

En este proyecto se han llegado a realizar 12 experimentos, cada uno de ellos a condiciones diferentes (ya fuese por trabajar a diferentes pH y/o con diferente disolución) y con el mismo objetivo: estudiar la eliminación de las especies iónicas disueltas en una disolución cuando se trabaja con una membrana de NF. Todos los experimentos se realizaron con el mismo tipo de membrana cerámica tubular Titania. Los doce experimentos se dividieron en dos fases de trabajo.

Con los 8 primeros experimentos se llegó a conocer el comportamiento del rechazo de la sal de Na_2SO_4 a lo largo de la escala de pH. Además, se comprobó que el efecto del pH en la membrana resulta un factor decisivo en el rechazo de especies iónicas. Se constató que a $\text{pH} < 4,8$ la carga positiva de la superficie de la membrana producía una mayor atracción sobre los grupos iónicos con carga negativa (SO_4^{2-} , HSO_4^-), y este efecto iba en aumento a medida que el valor del pH se acercaba a 0, obteniendo rechazos menores al 15%. Para $\text{pH} > 6,3$ la carga superficial de la membrana era negativa, obteniendo rechazos de SO_4^{2-} superiores al 70%. Se observó que el rechazo iba en aumento a medida que el pH se acercaba a 14. La zona de trabajo comprendida entre $\text{pH} 4,8$ y $\text{pH} 6,3$, resultó ser la zona de transición para el cambio de la carga superficial, cosa lógica teniendo en cuenta que el IEP para membranas de Titania es de un $\text{pH} 5,5$.

Con los 4 experimentos restantes, se analizó el comportamiento del rechazo del Na_2SO_4 en presencia de especies metálicas. Se averiguó que a medida que el pH disminuía las especies iónicas más rechazadas siempre eran las metálicas, y que el aumento de la permeabilidad se debía exclusivamente para cumplir el principio de electronegatividad. Pero en general, el rechazo de todas las especies iónicas nunca superó el 40% en rangos de pH de trabajos cercanos a 1 y a medida que se acercaban a este valor más se reducía el rechazo.

En los doce experimentos se quiso comprobar la viabilidad del SDFM. Desgraciadamente los resultados del estudio no fueron satisfactorios. En todos los casos, se comprobó que la graficación del modelo se ajustaba de la mejor forma posible a los resultados obtenidos del rechazo observado, a pesar que en algunos casos había una gran dispersión de valores. Pero los resultados incoherentes obtenidos de las permeabilidades de la membrana en el primer caso y la discordancia entre los resultados de las permeabilidades de la membrana y la graficación del modelo llevó a rechazar la validación del SDFM para esta membrana.

Finalmente, se quiso comparar los resultados de este trabajo con los resultados de proyectos que trabajaban con casos similares a los mostrados, pero con la diferencia que esos proyectos trabajan con distintos módulos de membranas poliméricas. En la comparación de membranas de los dos casos de estudio se obtuvo el mismo resultado, el rechazo de las especies iónicas a pH ácidos de trabajo y la

aplicación del SDFM resultó ser más favorable para las membranas poliméricas. En la comparación del primer caso de estudio, las membranas de Hydracore (a pH de trabajo de 2,8) y ESNA (a pH de trabajo de 1,8), obtuvieron un rechazo de las especies iónicas superior al 80% respecto a la membrana de Titania, que proporcionó un rechazo menor al 20%. En cuanto al segundo caso de estudio la membrana de NF-270 fue la que mejor porcentaje de rechazo mostró, obteniendo valores superiores al 75% respecto al rechazo del 25 % obtenido por la membrana de Titania.

En conclusión, las técnicas de NF pueden aportar grandes beneficios para el tratamiento de AAM. A partir de los resultados experimentales se ha podido observar que tanto las membranas poliméricas como la membrana de Titania pueden llegar a eliminar la acidez de la disolución, aunque la membrana de Titania en menor cantidad. Esto permite que ambas membranas puedan ser usadas conjuntamente, de tal forma que la membrana de Titania se use como pretratamiento para eliminar la acidez presente en la disolución y así reducir la degradación de los polímeros presentes en las membranas poliméricas. Por otra parte, con las membranas de Titania se han visto bajos rechazos a pH ácidos, todo lo contrario, en medios básicos, lo que las hace bastante eficientes para trabajar en estas condiciones.

Análisis Económico

En este apartado se realizará una valoración económica del proyecto. Los costes serán tratados en diferentes partidas, pero posteriormente todos se sumarán dando lugar a un único precio total (Tabla 17).

- Costes de reactivos

En este apartado se tendrán en cuenta los costes procedentes del uso de las especies químicas usadas a lo largo del experimento, los costes asociados a los reactivos se encuentran representados en la Tabla 11.

Tabla 11. Costes asociados a los reactivos

Reactivo	Cantidad	Precio	Coste (€)
Na ₂ SO ₄	92,51 g	5,04€/kg	0,47 €
NaOH	1 kg	263,44€/25 kg	10,53 €
H ₂ SO ₄	1,02 L	32,08€/5L	6,54 €
FeSO ₄ *7H ₂ O	25 g	3,37€/kg	0,08 €
CuSO ₄ *5H ₂ O	15 g	7,45€/kg	0,12 €
ZnSO ₄ *7H ₂ O	12,5 g	4,3€/kg	0,05 €
Acetona	220 ml	5,54€/L	1,21 €
Total			19,00 €

- Costes del agua

Durante la realización de los experimentos fue necesaria la utilización de dos tipos de agua (desionizada, Mili-Q), usadas en ciertos casos para la limpieza de la membrana y/o la preparación de disoluciones, estos costes se encuentran representados en la Tabla 12.

Tabla 12. Costes asociados al consumo del agua

Agua	Cantidad (L)	Precio(€/L)	Coste (€)
Desionizada	925,00	1,40	1.295,00 €
Mili-Q	9,00	2,80	25,20 €
Total			1.320,20 €

- Costes del material

Estos costes hacen referencia al material de laboratorio usado o que se debe usar en un laboratorio cuando se trabajan con productos químicos, estos costes se encuentran representados en la Tabla 13.

Tabla 13. Costes asociados al material de laboratorio usado

Concepto	Cantidad	Precio(€/uni.)	Coste (€)
Guantes	25 pares	2,5	2,50 €
Pipeta 10 ml	1	20,35	20,35 €
Micropipeta 1000-100 µl	1	28,5	28,50 €
Punta de micropipeta	10	4,35	43,50 €
Punta de pipeta	10	4,35	43,50 €
Gafas	1	5,95	5,95 €
Bata de laboratorio	1	22,43	22,43 €
Cinta teflón	1	2,26	2,26 €
Membrana cerámica TiO ₂	3	126,44	379,32 €
Total			548,31 €

- Costes de planta

La planta de NF está formada por diversos elementos, algunos de los cuales han sido utilizados no solo en este proyecto. Por este motivo el coste real de debido al uso de los aparatos usados ha calculado teniendo en cuenta la amortización de los aparatos.

$$\text{Coste de amortización} = \frac{\text{Precio del aparato}}{\text{Vida útil}} \cdot \text{periodo usado} \quad (\text{Ec. 0.1})$$

Donde los costes están expresados en (€) y van en función del precio del instrumento (€/unidad), el tiempo que se usó el equipo y su vida útil (años).

Así que para el cálculo procedentes del equipo usado en la planta se tuvieron en cuenta la vida útil de cada elemento, que no es igual para todos, y el tiempo de amortización (que corresponde a 3 meses, que fue este el periodo que se estuvo trabajando en el laboratorio realizando la parte experimental), los costes asociados al equipo de la planta piloto y del laboratorio se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Costes asociados al equipo de la planta piloto y del laboratorio

Equipo	Cantidad	Precio(€/unidad)	Vida útil (años)	Coste (€)
Bomba Hydra-Cell G10	1	3616	8	113,00 €
Tanque de 30L	1	185,35	8	5,79 €
Termostato de inmersión DIGIT-COOL	1	482,8	8	15,09 €
Tubo de PVC	3	2,3	5	0,12 €
Tubo de acero inoxidable	4	18	8	0,56 €
Válvula by-pass	1	268,8	8	8,40 €
Válvula de aguja	1	78,2	8	2,44 €
Caudalímetro	1	475	8	14,84 €
Manómetro	2	10	8	0,31 €
Filtro de cartucho	1	5,1	1	1,28 €

Vaso contenedor del filtro	1	16,95	5	0,85 €
Tubo capilar de plástico	3	9,95	5	0,50 €
Módulo de membrana	1	168,54	8	5,27 €
Variador de frecuencia + instalación	1	775	8	24,22 €
Cromatógrafo iónico	1	9492,68	8	296,65 €
Espectrofotómetro	1	6375,7	8	199,24 €
pH-metro	1	296,46	8	9,26 €
Conductímetro	1	448,93	8	14,03 €
Balanza de precisión	1	107,95	8	3,37 €
Total				715,22 €

- Costes del uso de la planta

En este apartado se ha tenido en cuenta los gastos debido a la electricidad consumida debido al uso de los equipos. El precio actual de las tarifas de luz ronda los 0,13€/kWh pero el consumo más grande de electricidad es el procedente al funcionamiento de la bomba, la cual tiene un consumo de 0,6kW/h, los costes asociados consumo de electricidad se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Costes asociados al consumo de electricidad

Concepto		Cantidad (horas)	Precio(€/hora)	Coste (€)
Electricidad	Planta	314	0,13 € /kW·h	40,82 €
	Conductimetro			
	pH-metro			
	Cromatógrafo iónico	168		21,84 €
	Espectrofotómetro	7		0,91 €
	Bomba	210	0,6 € /kW·h	1.260,00 €
Total				1.323,57 €

- Costes de personal

Por último, se contabilizan los costes derivados a la contratación de una persona por la realización del trabajo, así como de una segunda persona debida a la corrección de la memoria.

Para la contratación de la persona para realizar el proyecto, se asume un sueldo corresponde a un ingeniero técnico según el convenio de la Federación Empresarial de la Industria Química Española. El salario mínimo corresponde a 30.152,36€, y teniendo en cuenta que la jornada laboral es de 8 horas diarias, 5 días semanales y 320 días al año, se ha calculado que el salario por hora es de 12€, los costes asociados al personal del proyecto se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Costes asociados al personal del proyecto

Concepto	Cantidad (horas)	Precio(€/hora)	Coste (€)
Búsqueda bibliográfica	50	12	600,00 €
Realización de los experimentos	164	12	1.968,00 €
Modelización y análisis de resultados	200	12	2.400,00 €
Redacción de la memoria	260	12	3.120,00 €
Revisión de la memoria	30	12	360,00 €
Total			8.448,00 €

- Coste final del proyecto

Una vez calculado todos los costes individualmente, se suman y se le aplica el 21% del IVA correspondiente, el coste total del proyecto se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Coste del proyecto

Concepto	Coste (€)
Reactivos	19,00 €
Agua	1.320,20 €
Material del laboratorio	548,31 €
Equipo del experimento	715,22 €
Uso del laboratorio	1.323,57 €
Personal	8.448,00 €
Total 1	12.374,30 €
IVA (21% Total 1)	2.598,60 €
Total 2	14.972,90 €

Bibliografía

- Aguiar, L. Andrade, L. Grossi, W. Pires, M. Amaral (2018). *Acid mine drainage treatment by nanofiltration: A study of membrane fouling, chemical cleaning, and membrane ageing*. Separation and Purification Technology. vol.192, pp.185–195.
- Arriola Simón, Carles (2015). *Eliminació d'acid sulfúric mitjançant membranes de nanofiltració: Efecte del pH i la concentració*; Trabajo Final de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Baird (2001). *Química ambiental 2ª Edición*. Editorial Reverté S.A. ISBN: 842917902X
- R. W. BAKER (2004). *Membrane Technology and Applications 2nd Edition*. Second. California.
- Galindo Ramos, Manuel (2015). *Separación y recuperación de ácido sulfúrico en aguas ácidas de minas mediante Nanofiltración*. Trabajo Final de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chen, P., Ma, X., Zhong, Z., Zhang, F., Xing, W., & Fan, Y. (2017). *Performance of ceramic nanofiltration membrane for desalination of dye solutions containing NaCl and Na₂SO₄*. Desalination, vol. 404, pp.102–111.
- S. Duscher (2014). *Ceramic membranes for the filtration of liquids : An actual overview*. Filtration & separation International Edition. no.14, pp.13–21 (2014).
- J. B. Ewis, S. J. Ergas, D.P. Y. Chang, E. D. Schroeder (1999). *Principios de Biorrecuperación: Tratamientos para la descontaminación y la regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisicoquímicos*. España, Madrid, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.U.A. ISBN: 8448125118
- V. Gitis, G. Rothenberg (2016). *Ceramic Membranes: New Opportunities and Practical Applications*. Weinheim, Germany Wiley. ISBN: 9783527696581
- Harris, Daniel (2006). *Análisis Químico Cuantitativo 3ª Edición*. Barcelona, Reverté. ISBN: 8429172246
- J. A. Jacobs, J. H. Lehr, S. M. Testa (2014). *Acid mine drainage, rock drainage, and acid sulfate soils: Causes, assessment, prediction, prevention, and remediation*. Hoboken, New Jersey: Wiley. ISBN: 9780470487860

J.Ma. Marti Deulofeu, S. Marti Costa, R. Queral, A. Pujdas i Niño, J. Mur Higuera, J. Ruffo Gamiz, Gregorio de Dios de Dios, Jose Carbonell i Margenat (2007). *Stenco: Tratamientos de aguas, 4ª Edición*. Barcelona: STENCO

Pagès N., Yaroshchuk A., Gibert O. & Cortina J.L. (2013). *Rejection of trace ionic solutes in nanofiltration: Influence of aqueous phase composition*. Chemical Engineering Science. vol. 104. pp. 1107-1115.

J. M. M. Peeters, M. H. V. Mulder, H. Strathmann (1999). *Streaming potential measurements as a characterization method for nanofiltration membranes*. Colloids and Surface. A: Physicochemical and Engineering Aspects. vol.150, pp. 247–259.

M. Place (2013). *Ceramic Membranes in Chemical and Pharmaceutical Applications*. Ceramic applications vol. 1, pp.19–23.

P. Puhlfürß, A. Voigt, R. Weber, M. Morbé (2000). *Microporous TiO₂ membranes with a cut off <500 Da*. Journal of Membrane Science. vol. 174, pp.123–133.

Schäfer, A.I., Fane, A.G. (2005). Waite, *Nanofiltration: Principles and Applications, 1st Edition*. Oxford, UK: Elsevier Science.

R. B. Schoch, J. Han, P. Renaud (2008). *Transport phenomena in nanofluidics*. Reviews of Modern Physics. vol.80, pp. 839–883.

G. S. Simate, S. Ndlovu (2014). *Acid mine drainage: Challenges and opportunities*. Journal of Environmental Chemical Engineering, vol.2. no.3, pp. 1785–1803.

R. Singh, Nicholas P. Hankins (2016). *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment*. Elsevier ISBN: 9780444633125

T. Van Gestel et al. (2002). *Salt retention in nanofiltration with multilayer ceramic TiO₂ membranes*. Journal of Membrane Science. vol. 209, pp.379–389.

E. Yaroshchuk (2000). *Dielectric exclusion of ions from membranes*. Advances in Colloid and Interface Science. vol.85, pp.193-230.

Yaroshchuk, Xavier Martínez-Lladó, Laia Llenas, Miquel Rovira, Joan Pablo (2011). *Solution-diffusion-film model for the description of pressure-driven trans-membrane transfer of electrolyte mixtures: One dominant salt and trace ions*. Journal of Membrane Science. vol 368, pp.192-201.

Anexos

Anexo A: Descripción de membranas poliméricas

Membrana NF-270

La membrana NF-270 pertenece a la empresa Dow Chemical. Esta membrana presenta 3 capas bien diferenciadas, que a continuación se podrá observar en el siguiente esquema de distribución (Figura 45).

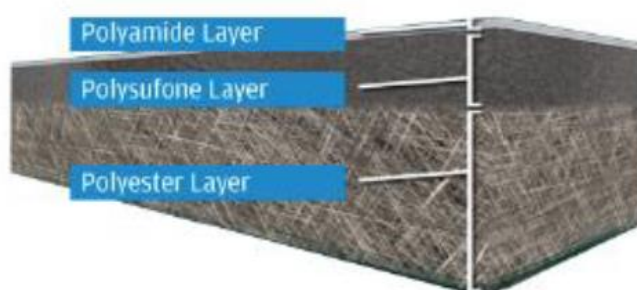


Figura 45. Estructura interna de la membrana [Fuente: Arriola, 2015]

La capa inferior tiene un grosor de unas 0,25 micras y está formada por poliéster, la cual da solidez a la membrana. La capa intermedia, tiene un grosor entre 40 y 100 micras, y está formada por polisulfona, la cual aporta resistencia al conjunto de la membrana. La capa superior, tiene un grosor entre 100 y 200 micras, la cual está formada por poliamida y es la que tiene la propiedad de exclusión de las especies. Los límites de la operación de la membrana NF-270 viene descritos por el fabricante y son los siguientes mostrados en la Figura 46.

Operating Limits	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane Type • Maximum Operating Temperature • Maximum Operating Pressure • Maximum Pressure Drop • pH Range, Continuous Operation^a • pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)^b • Maximum Feed Flow • Maximum Feed Silt Density Index • Free Chlorine Tolerance^c 	<p>Polypiperazine Thin-Film Composite</p> <p>113°F (45°C)</p> <p>600 psig (41 bar)</p> <p>15 psig (1.0 bar)</p> <p>3 - 10</p> <p>1 - 12</p> <p>70 gpm (15.9 m³/hr)</p> <p>SDI 5</p> <p><0.1 ppm</p>
-------------------------	---	---

^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 85°F (36°C).

^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.

^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, DOW FILMTEC recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-23010 for more information.

Figura 46. Límites de operación para la membrana NF-270 proporcionados por el fabricante. [Arriola, 2015]

Membrana Hydracore 70 pHT

Los límites de la operación de la membrana Hydracore 70pHT viene descritos por el fabricante y son los mostrados en la Figura 47.

Application Data	Maximum Applied Pressure:	600 psig (bar)
	Maximum Continuous Chlorine Concentration ² :	10 PPM
	Maximum Chlorine Concentration for Cleaning ² :	100 PPM
	Maximum Operating Temperature:	158°F (70 °C)
	Operating pH Range:	1 - 13.5
	Cleaning pH Range:	1 - 13.5
	Maximum Pressure Drop for a vessel	60 psi (4 bar)

Figura 47. Límites de operación para la membrana Hydracore proporcionados por el fabricante.[Arriola, 2015]

En este caso se puede observar que al menos de manera teórica, esta membrana aguanta rangos de trabajo más extremos que la anterior, pueden trabajar a pH muy ácidos o básicos, y soportan altas temperaturas hasta 70°C. Respecto a su composición es similar a la NF-270, es decir está formada también por tres capas. Lo único que su capa superior está formada por poli étersulfona sulfonada

Membrana ESNA

La membrana ESNA se encuentra fabricada por los mismos componentes que la membrana NF-270, por lo que ciertas características resultan idénticas. Las especificaciones del fabricante son las mostradas en Figura 48.

Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.16 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	Feedwater pH Range:	3.0 - 10.0
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	16 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
	Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi

* The limitations shown here are for general use. The values may be more conservative for specific projects to ensure the best performance and longest life of the membrane.

Figura 48. Límites de operación para la membrana ESNA proporcionados por el fabricante. [Arriola, 2015]

Anexo B: Gráficas de rechazo obtenidas por conductimetría a cada presión de trabajo

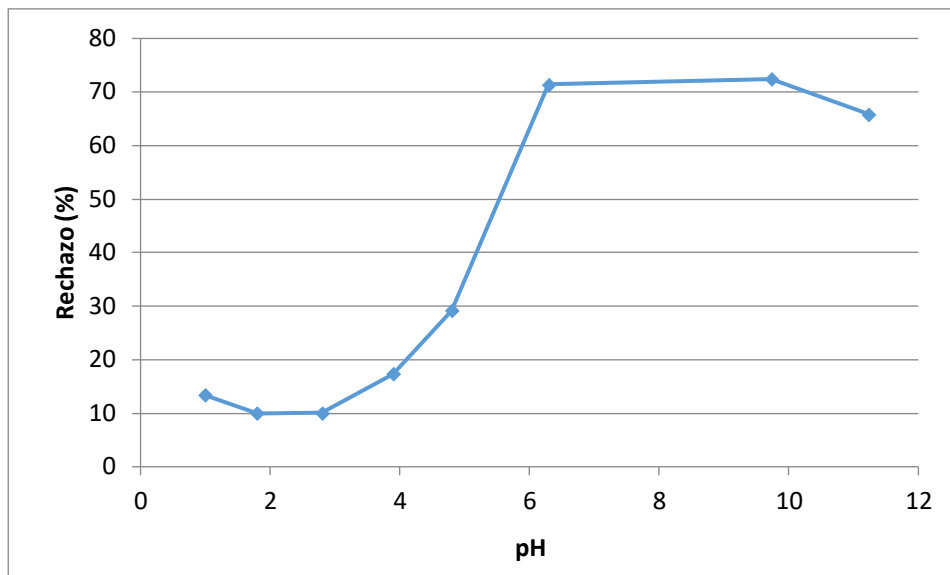


Figura 49. Rechazo en función del pH a 6 bar.

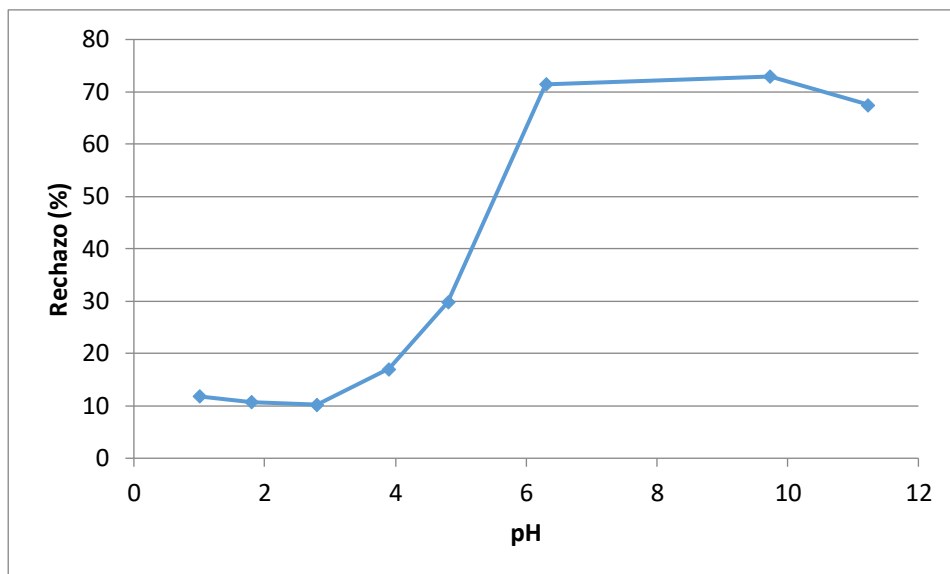


Figura 50. Rechazo en función del pH a 7 bar.

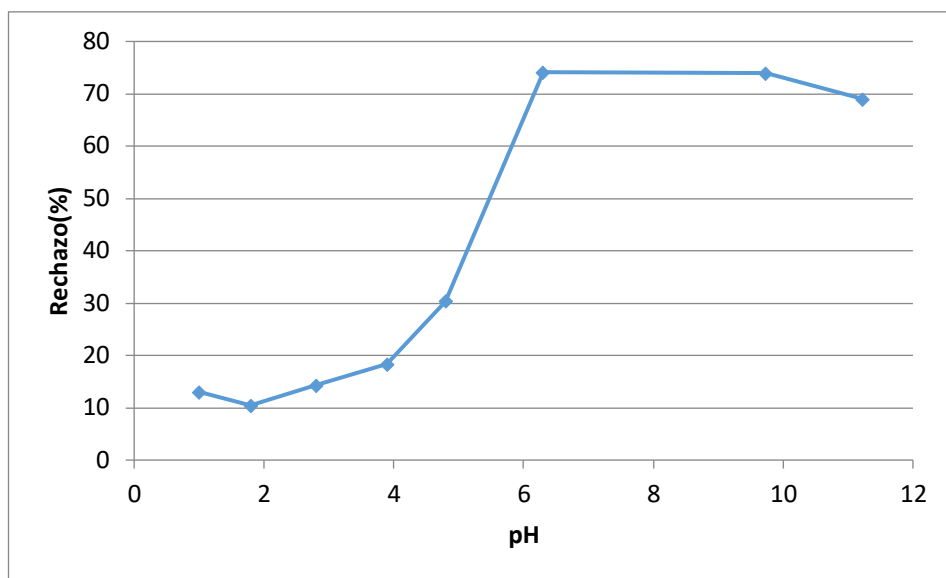


Figura 51. Rechazo en función del pH a 8bar.

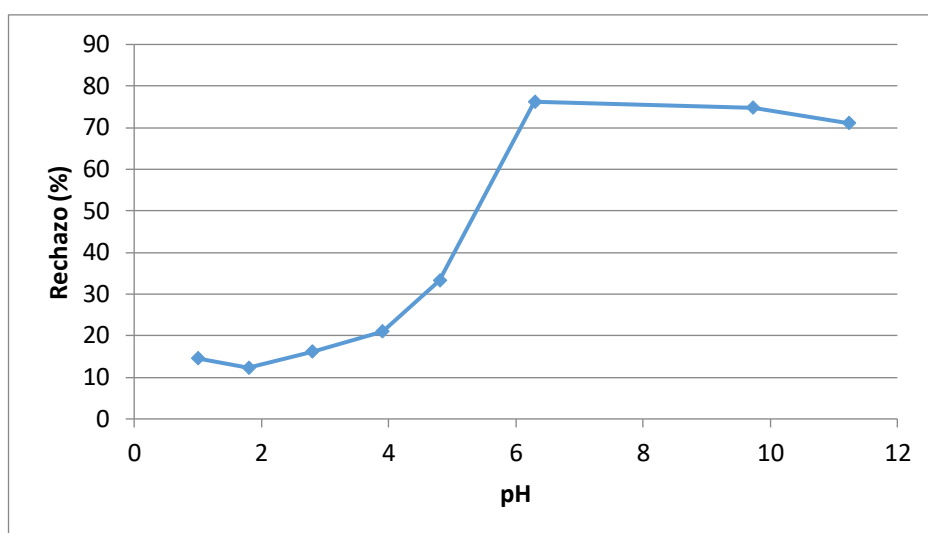


Figura 52. Rechazo en función del pH a 10 bar.

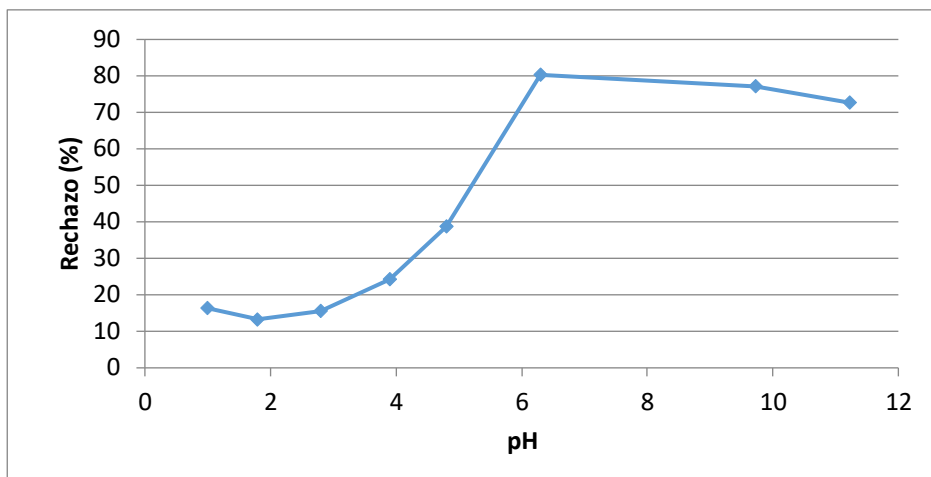


Figura 53. Rechazo en función del pH a 11 bar.

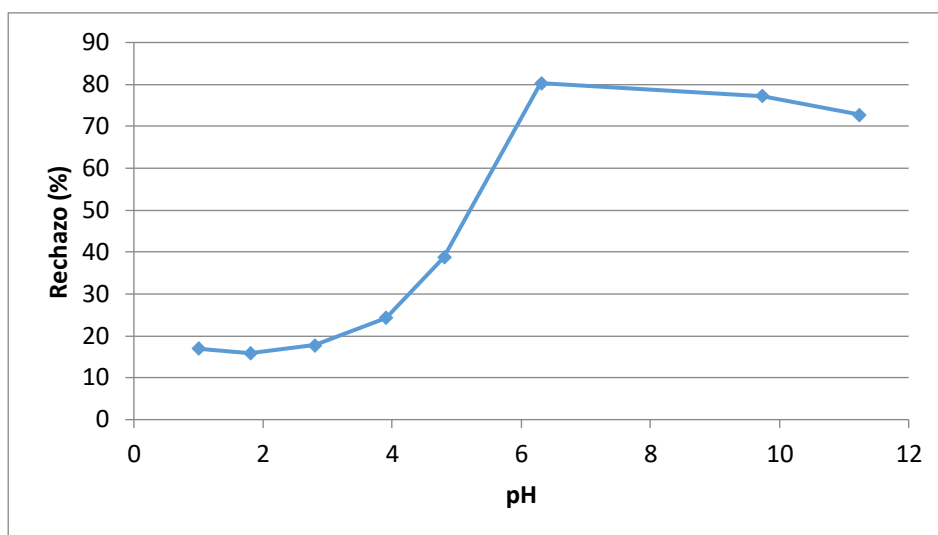


Figura 54. Rechazo en función del pH a 12 bar.

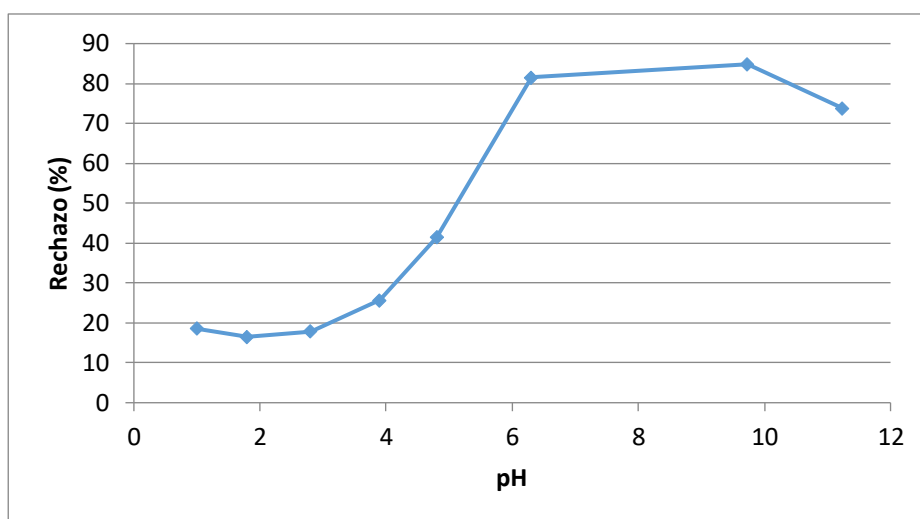


Figura 55. Rechazo en función del pH a 13bar.

Anexo C: Fichas de seguridad de los reactivos utilizados en el proyecto

Versión y fecha de revisión: 5 07.10.2017. Fecha de edición: 07.10.2017.



Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (UE) 830/2015

1058 Acido Sulfúrico 93-98%

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto
Denominación:
Acido Sulfúrico 93-98%

Nº de Registro REACH: 01-2119458838-20-XXXX

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Escenario Exposición	Grupos de usuarios principales	Sector de uso (SU)	Categoría de productos químicos (PC)	Categoría de procesos (PROC)	Categoría de artículo (AC)	Categoría de emisiones al medio ambiente (ERC)
Producción de la sustancia.	Producción	SU 0	PC 19	PROC 1 PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 8a PROC 8b PROC 9	AC 1	ERC 1

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad:
PANREAC QUÍMICA S.L.U.
C/Garraf 2
Polígono Pla de la Bruguera
E-08211 Castellar del Vallès
(Barcelona) España
Tel. (+34) 937 489 400
e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:
Tel 24h Panreac Química S.L.U. +(34)937 489 499
Tel Centro de información toxicológica del INTCP +(34)91 562 04 20

2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Corr. cut. 1A

2.2 Elementos de la etiqueta:

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia
Peligro

Indicaciones de peligro
H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia
P260 No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.
P264 Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.
P280 Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.
P301+P330+P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.
P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
P501 Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.

2.3 Otros peligros:
No existen más datos relevantes disponibles.

3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Denominación: Acido Sulfúrico 93-98%
Fórmula: H₂SO₄ M.= 98,08 CAS [7664-93-9]
Número CE (EINECS): 231-639-5
Número de índice CE: 016-020-00-8
Nº de Registro REACH: 01-2119458838-20-XXXX

3.2 Mezclas
No se trata de una mezcla

4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios
En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.



4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No existen más datos relevantes disponibles.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Ingestión:

Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Extraer el producto con un algodón impregnado en polietilenglicol 400.

Ojos:

Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir atención médica.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción:

Los apropiados al entorno.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:

Incombustible. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos de SO_x. En contacto con metales puede formarse hidrógeno gaseoso (existe riesgo de explosión).

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:

Ropa y calzado adecuados. Equipo de respiración autónomo.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:

No inhalar los vapores. Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa. Procurar una ventilación apropiada.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:

Recoger con materiales absorbentes (Absorbente General Panreac, Kieselguhr, etc.) o en su defecto arena o tierra secas y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante. Neutralizar con sodio hidróxido diluido.

6.4 Referencia a otras secciones

No aplicable

7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura:

Sin indicaciones particulares.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades:

Recipientes bien cerrados. En local bien ventilado.

Temperatura de almacenamiento recomendada: Temperatura ambiente. No almacenar en recipientes metálicos.

7.3 Usos específicos finales

No existen más datos relevantes disponibles

8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control:

VLA-EC: 3 mg/m³ VLA-ED(H₂SO₄): 1 mg/m³

8.2 Controles de la exposición

Asegurar una buena ventilación y renovación de aire del local.

Protección respiratoria:

En caso de formarse vapores/aerosoles, usar equipo respiratorio adecuado. Filtro P.

Protección de las manos:

Usar guantes apropiados neopreno PVC

Protección de los ojos/la cara:

Usar gafas de seguridad.

Medidas de higiene particulares:

Quitarse las ropas contaminadas. Usar ropa de trabajo adecuada. Lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo.

Control de la exposición medio ambiental:

Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente.

9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto: Líquido

Color: incoloro

Granulometría: N/A

Olor: Característico.

pH:

N/A

Punto de fusión/punto de congelación: -15 °C

Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición: 330 °C

Punto de inflamación:

N/A

Inflamabilidad (sólido, gas):

N/A

Límites superior/inferior de inflamabilidad o de explosividad:

N/A

Presión de vapor: 0,0001 hPa (20 °C)

Densidad de vapor: N/A



Versión y fecha de revisión: 5.02.06.2013. Reemplaza: 15.09.2011.



Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (CE) 1907/2006 y
(UE) 453/2010

1687 Sodio Hidróxido lentejas

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Denominación:

Sodio Hidróxido lentejas

Sinónimo:

Sosa Cáustica

CAS: [1310-73-2]

Nº de Registro REACH: 01-2119457092-27-XXXX

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla:

Escenario Exposición	Grupos de usuarios principales	Sector de uso (SU)	Categoría de productos químicos (PC)	Categoría de procesos (PROC)	Categoría de artículo (AC)	Categoría emisiones medio ambiente (ERC)
Producción	Industrial	SU 3 SU 8		PROC 1 PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 8a PROC 9 PROC 1 PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 8a PROC 8b PROC 9 PROC 1 PROC 2 PROC 3 PROC 4 PROC 5 PROC 8a PROC 8b PROC 9 PROC 10 PROC 11 PROC 13 PROC 15		ERC 1
Producción	Industrial	SU 3 SU 8				ERC 1
Industrial, Profesional		SU 1- SU 24	PC 6 - PC 40			ERC 1 ERC 2 ERC 4 ERC 6a ERC 6b ERC 7 ERC 8a ERC 8b ERC 9 ERC 10 ERC 11 ERC 13 ERC 15
Uso para consumidores		SU 21	PC 6 - PC 40			ERC 8a ERC 8b ERC 10 ERC 11

1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

PANREAC QUÍMICA S.L.U.

C/Garraf 2

Polígono Pla de la Bruguera

E-08211 Castellar del Vallès

(Barcelona) España

Tel. (+34) 937 489 400

e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)

Tel.: (+34) 937 489 499

2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Clasificación Reglamento (CE) nº 1272/2008.

Corr. cut. 1A

Corr. met. 1



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Clasificación (67/548/CEE o 1999/45/CE).

C Corrosivo

R35

2.2 Elementos de la etiqueta:

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
H290 Puede ser corrosivo para los metales.

Consejos de prudencia

P260 No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.
P280 Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.
P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
P310 Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACION TOXICOLOGICA o a un médico.
P501 Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.

Para más información de las Frases R mencionadas en este epígrafe, vea epígrafe 16.

2.3 Otros peligros:

No existen más datos relevantes disponibles.

3. Composición/información sobre los componentes

Denominación: Sodio Hidróxido lentes
Fórmula: NaOH M.= 40,00 CAS [1310-73-2]
Número CE (EINECS): 215-185-5
Número de índice CE: 011-002-00-6
Nº de Registro REACH: 01-2119457892-27-XXXX

4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales:

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de asfixia proceder a la respiración artificial. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

4.3 Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. En caso de irritación, pedir atención médica.

4.4 Ojos:

Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir inmediatamente atención médica.

4.5 Ingestión:

Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción apropiados:

Dióxido de carbono (CO₂). Polvo seco. Cúbrir con tierra o arena secas.

5.2 Medios de extinción no apropiados:

Agua.

5.3 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:

Incombustible. En contacto con metales puede formarse hidrógeno gaseoso (existe riesgo de explosión). Reacciona violentamente con agua.

5.4 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:

Ropa y calzado adecuados. Equipo de respiración autónomo.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:

No inhalar el polvo. Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:

Prevenir la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:

Recoger en seco y depositar en contenedores de residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Neutralizar con ácido sulfúrico diluido.



Versión y fecha de revisión: 4/15/08/2011 Fecha de edición: 15/09/2011.



Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (CE) 1907/2006 y
(UE) 453/2010

1716 Sodio Sulfato anhidro

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Denominación:

Sodio Sulfato anhidro

CAS: [7757-82-6]

Nº de Registro REACH: No hay disponible un número de registro para esta sustancia, ya que la sustancia o su uso están exentos del registro; según el Artículo 2 de la normativa REACH (CE) nº 1097/2006, el tonelaje anual no requiere registro, dicho registro está previsto para una fecha posterior o se trata de una mezcla.

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla:

Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

PANREAC QUÍMICA S.L.U.

C/Garraf 2

Polígono Pla de la Bruguera

E-08211 Castellar del Vallès

(Barcelona) España

Tel. (+34) 937 489 400

e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)

Tel.: (+34) 937 489 499

2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Sustancia no peligrosa según Reglamento (CE) 1272/2008.

Para más información de las Frases R mencionadas en este epígrafe, vea epígrafe 16.

2.3 Otros peligros:

No existen más datos relevantes disponibles.

3. Composición/información sobre los componentes

Denominación: Sodio Sulfato anhidro

Fórmula: Na₂SO₄ M.= 142,04 CAS [7757-82-6]

Número CE (EINECS): 231-820-9

4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales:

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre.

4.3 Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua.

4.4 Ojos:

Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos.

4.5 Ingestión:

En caso de malestar, pedir atención médica.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción apropiados:

Los apropiados al entorno.

5.2 Medios de extinción no apropiados:

No se conocen.

5.3 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:

Incombustible.

5.4 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:

Ropa y calzado adecuados.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:

No inhalar el polvo.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:

Prevenir la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:

Recoger en seco. Limpiar los restos con agua abundante.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

Versión y fecha de revisión: 5 07.10.2017. Fecha de edición: 07.10.2017.



Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (UE) 830/2015

1362 Hierro(II) Sulfato 7-hidrato

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Denominación:

Hierro(II) Sulfato 7-hidrato

Sinónimo:

Vitriolo verde

Nº de Registro REACH: No hay disponible un número de registro para esta sustancia, ya que la sustancia o su uso están exentos del registro; según el Artículo 2 de la normativa REACH (CE) nº 1097/2006, el tonelaje anual no requiere registro, dicho registro está previsto para una fecha posterior o se trata de una mezcla.

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad:

PANREAC QUÍMICA S.L.U.

C/Garraf 2

Polígono Pla de la Bruguera

E-08211 Castellar del Vallès

(Barcelona) España

Tel. (+34) 937 489 400

e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Tel 24h Panreac Química S.L.U. +(34)937 489 499

Tel Centro de información toxicológica del INTCP +(34)91 562 04 20

2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Tox. ag. 4

Irrit. oc. 2

Irrit. cut. 2

2.2 Elementos de la etiqueta:

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Atención

Indicaciones de peligro

H302 Nocivo en caso de ingestión.

H319 Provoca irritación ocular grave.

H315 Provoca irritación cutánea.

Consejos de prudencia

P264 Lavarse...conienzudamente tras la manipulación.

P270 No comer, beber ni fumar durante su utilización.

P280 Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.

P301+P312 EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.

P302+P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.

P501 Eliminar el contenido/el recipiente según Directive 94/62/CE o 2008/98/CE.

2.3 Otros peligros:

No existen más datos relevantes disponibles.

3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Denominación: Hierro(II) Sulfato 7-hidrato

Fórmula: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ M.= 278,02 CAS [7782-63-0]

Número CE (EINECS): 231-753-5

3.2 Mezclas

No se trata de una mezcla

4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No existen más datos relevantes disponibles.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Ingestión:

Beber agua abundante. En caso de pérdida del conocimiento colocar a la persona tumbada lateralmente. Pedir inmediatamente atención médica.

Inhalación:

Ir al aire fresco.

Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas.

Ojos:

Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción:

Los apropiados al entorno.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:

Incombustible. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos de

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:

Ropa y calzado adecuados.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:

Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:

Recoger en seco y depositar en contenedores de residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.

6.4 Referencia a otras secciones

No aplicable

7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura:

Sin indicaciones particulares.

Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (CE) 1907/2006



1787 Zinc Sulfato 7-hidrato

1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa

1.1 Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación:

Zinc Sulfato 7-hidrato

Sinónimo:

Vitriolo blanco

Nº de Registro REACH: No hay disponible un número de registro para esta sustancia, ya que la sustancia o su uso están exentos del registro; según el Artículo 2 de la normativa REACH (CE) nº 1097/2006, el tonelaje anual no requiere registro, dicho registro está previsto para una fecha posterior o se trata de una mezcla.

1.2 Uso de la sustancia o preparado:

Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

PANREAC QUÍMICA S.L.U.

C/Garraf 2

Polígono Pla de la Bruguera

E-08211 Castellar del Vallès

(Barcelona) España

Tel.: (+34) 937 489 400

e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)

Tel.: (+34) 937 489 499

2. Identificación de los peligros

Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Clasificación Reglamento (CE) nº 1272/2008.

Tox. ag. 4

Les. oc. 1

Acuático agudo. 1

Acuático crónico. 1

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H302 Nocivo en caso de ingestión.

H318 Provoca lesiones oculares graves.

H410 Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia

P264 Lavarse...concienzadamente tras la manipulación.

P270 No comer, beber ni fumar durante su utilización.

P273 Evitar su liberación al medio ambiente.

P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.

P301+P312 EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.

P305+P351+P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.

Clasificación (67/548/CEE o 1999/45/CE).

N Peligroso para el medio ambiente

R50/53

Xn Nocivo

R41

R22

Para más información de las Frases R mencionadas en este epígrafe, vea epígrafe 16.

3. Composición/Información de los componentes

Denominación: Zinc Sulfato 7-hidrato

Fórmula: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ M.= 287,54 CAS [7446-20-0]

Número CE (EINECS): 231-793-3

Número de índice CE: 030-006-00-9

4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales:

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre.

4.3 Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitar las ropas contaminadas.

4.4 Ojos:

Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos. En caso de irritación, pedir atención médica.

4.5 Ingestión:

Beber agua abundante. Provocar el vómito. Pedir atención médica.



5. Medidas de lucha contra incendio

5.1 Medios de extinción adecuados:

Los apropiados al entorno.

5.2 Medios de extinción que NO deben utilizarse:

No se conocen

5.3 Riesgos especiales:

Incombustible. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos de

5.4 Equipos de protección:

Ropa y calzado adecuados.

6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones individuales:

No inhalar el polvo.

6.2 Precauciones para la protección del medio ambiente:

Prevenir la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos de recogida/limpieza:

Recoger en seco y depositar en contenedores de residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.

7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Manipulación:

Sin indicaciones particulares.

7.2 Almacenamiento:

Recipientes bien cerrados. Ambiente seco. Temperatura ambiente.

8. Controles de exposición/protección personal

8.1 Medidas técnicas de protección:

Sin indicaciones particulares.

8.2 Control límite de exposición:

: Datos no disponibles.

8.3 Protección respiratoria:

En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado.

8.4 Protección de las manos:

Usar guantes apropiados

8.5 Protección de los ojos:

Usar gafas apropiadas.

8.6 Medidas de higiene particulares:

Quitarse las ropas contaminadas. Usar ropa de trabajo adecuada. Lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo.




Ficha de datos de seguridad
según 1907/2006/CE, Artículo 31

página: 1/9
fecha de impresión 03.06.2017
Revisión: 29.05.2017
Número de versión 4

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

- 1.1 Identificador del producto
- Nombre comercial: sulfato de cobre pentahidratado
- Número del artículo: A3880
- Número CAS: 7758-99-8
- Número CE: 231-847-6
- Número de clasificación: 029-023-00-4
- Número de registro 01-2119520566-40-XXXX
- 1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados
No existen más datos relevantes disponibles.
- Utilización del producto / de la elaboración Laboratory chemical
- 1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad
- Fabricante/distribuidor:
AppliChem GmbH
Ottoweg 4
D-64291 Darmstadt
Tel.: +49 (0)6151 93570
Fax.: +49 (0)6151 935711
mads@appliChem.com
- Área de información: Dept. Compliance
- 1.4 Teléfono de emergencia: +49(0)6151 93570 (inside normal business hours)

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

- 2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla
- Clasificación con arreglo al Reglamento (CE) nº 1272/2008
Acute Tox. 4 H302 Nocivo en caso de ingestión.
Eye Dam. 1 H318 Provoca lesiones oculares graves.
Aquatic Chronic 1 H410 Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
- 2.2 Elementos de la etiqueta
- Etiquetado con arreglo al Reglamento (CE) nº 1272/2008
La sustancia se ha clasificado y etiquetado de conformidad con el reglamento CLP.
- Pictogramas de peligro

GHS05 GHS07 GHS09
- Palabra de advertencia Peligro
- Indicación de peligro
H302 Nocivo en caso de ingestión.
H318 Provoca lesiones oculares graves.
H410 Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
- Consejo de prudencia
P273 Evitar su liberación al medio ambiente.

(se continúa en página 2)



Nombre comercial: sulfato de cobre pentahidratado	
P302+P352 P305+P351+P338	<p>(se continúa en página 1)</p> <p>EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con abundante agua y jabón. EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.</p> <p>• 2.3 Otros peligros • Resultados de la valoración PBT y mPmB • PBT: No aplicable. • mPmB: No aplicable.</p>
SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes	
<p>• 3.1 Caracterización química: Sustancias • Denominación N° CAS 7758-99-8 sulfato de cobre pentahidratado • Número(s) de identificación Número CE: 231-847-6 • Número de clasificación: 029-023-00-4</p>	
SECCIÓN 4: Primeros auxilios	
<p>• 4.1 Descripción de los primeros auxilios</p> <p>• Instrucciones generales: Los síntomas de intoxicación pueden presentarse después de muchas horas, por lo que se requiere una supervisión médica durante un mínimo de 48 horas después del accidente. Recurrir a un médico de inmediato.</p> <p>• En caso de inhalación del producto: Las personas desmayadas deben tenderse y transportarse de lado con la suficiente estabilidad.</p> <p>• En caso de contacto con la piel: Recurrir a un médico inmediatamente. Lavar inmediatamente con agua y jabón y enjuagar bien.</p> <p>• En caso de con los ojos: Limpiar los ojos abiertos durante varios minutos con agua corriente. En caso de trastornos persistentes consultar un médico. Recurrir a un médico inmediatamente.</p> <p>• En caso de ingestión: Hacer beber agua (máximo 2 vasos). Consultar inmediatamente un médico. Avisar inmediatamente al médico.</p> <p>• 4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados No existen más datos relevantes disponibles.</p> <p>• 4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente No existen más datos relevantes disponibles.</p>	
SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios	
<p>• 5.1 Medios de extinción</p> <p>• Sustancias extintoras apropiadas: CO₂, polvo extintor o chorro de agua rociada. Combatir incendios mayores con chorro de agua rociada o espuma resistente al alcohol.</p> <p>• 5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla Dióxido de azufre (SO₂) óxidos de azufre (SO₂, SO₃)</p> <p>• 5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios Equipo especial de protección: Llevar puesto un aparato de respiración autónoma.</p> <p>(se continúa en página 3)</p>	

Nombre comercial: sulfato de cobre pentahidratado

(se continúa en página 2)

Indicaciones adicionales

Los restos de incendio así como el agua de extinción contaminada deben desecharse de acuerdo con las normativas vigentes.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

- 6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**
Evitar la formación de polvo.
No inhalar el polvo.
Evitar el contacto con la sustancia.
Asegurarse de que haya suficiente ventilación.
- 6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:**
Al penetrar en las aguas o en el alcantarillado, avisar a las autoridades pertinentes.
Evitar que penetre en la canalización / aguas de superficie / agua subterráneas.
- 6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:**
Recoger mecánicamente.
Evitar la formación de polvo.
Desechar el material contaminado como vertido según ítem 13.
Aclarar después.
- 6.4 Referencia a otras secciones**
Ver capítulo 7 para mayor información sobre una manipulación segura.
Ver capítulo 8 para mayor información sobre el equipo personal de protección.
Para mayor información sobre cómo desechar el producto, ver capítulo 13.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

- 7.1 Precauciones para una manipulación segura**
Evitar la formación de polvo.
Retirar con regularidad el polvo que se forma inevitablemente.
- Prevenición de incendios y explosiones:** No se requieren medidas especiales.
- 7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**
Almacenamiento:
Exigencias con respecto al almacén y los recipientes:
Evitar de manera segura la penetración en el suelo.
Normas en caso de un almacenamiento conjunto: No es necesario.
Indicaciones adicionales sobre las condiciones de almacenamiento:
Mantener el recipiente cerrado herméticamente.
El recipiente solamente debe abrirse con un sistema de aspiración local.
Almacenar bajo llave o con acceso permitido solamente a profesionales o personal autorizado.
Temperatura de almacenamiento recomendada: +15 - +25 °C
Clase de almacenamiento: 10 - 13
7.3 Usos específicos finales No existen más datos relevantes disponibles.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

- Indicaciones adicionales para el acondicionamiento de instalaciones técnicas:**
Sin datos adicionales, ver punto 7.
- 8.1 Parámetros de control**
Componentes con valores límite admisibles que deben controlarse en el puesto de trabajo:
Nulo.

PNEC

Aquatic compartment - freshwater	0,0078 mg/L
Aquatic compartment - marine water	0,0052 mg/L
Aquatic compartment - sediment in freshwater	87 mg/kg

(se continúa en página 4)

Nombre comercial: sulfato de cobre pentahidratado

(se continúa en página 3)

Aquatic compartment - sediment in marine water	676 mg/kg
Terrestrial compartment - soil	65,5 mg/kg
Sewage treatment plant	0,23 mg/L

Indicaciones adicionales:

Como base se han utilizado las listas vigentes en el momento de la elaboración.

8.2 Controles de la exposición

Equipo de protección individual:

Medidas generales de protección e higiene:

- Mantener alejado de alimentos, bebidas y alimentos para animales.
- Quitarse de inmediato la ropa ensuciada o impregnada.
- Lavar las manos antes de las pausas y al final del trabajo.
- Limpieza de la ropa sucia por aspiración. No soplar con aire comprimido o utilizar cepillos.
- Evitar el contacto con los ojos y la piel.

Protección respiratoria:

Si la exposición va a ser breve o de poca intensidad, colocarse una máscara respiratoria. Para una exposición más intensa o de mayor duración, usar un aparato de respiración autónoma.

Protección de manos:



Guantes de protección

El material del guante deberá ser impermeable y resistente al producto / sustancia / preparado. Selección del material de los guantes en función de los tiempos de rotura, grado de permeabilidad y degradación.

Material de los guantes

La elección del guante adecuado no depende únicamente del material, sino también de otras características de calidad, que pueden variar de un fabricante a otro.

Tiempo de penetración del material de los guantes

El tiempo de resistencia a la penetración exacto deberá ser pedido al fabricante de los guantes. Este tiempo debe ser respetado.

Para el contacto permanente con adecuados los guantes compuestos por los siguientes materiales:

Espesor recomendado: $\geq 0,11$ mm

Valor de permeación: Nivel ≥ 480 min

Para protegerse contra calpoaduras son adecuados los guantes compuestos por los siguientes materiales:

Espesor recomendado: $\geq 0,11$ mm

Valor de permeación: Nivel ≥ 480 min

Protección de ojos:



Gafas de protección herméticas

Protección del cuerpo:

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa.



Versión y fecha de revisión: 6 07.10.2017. Fecha de edición: 07.10.2017.



Ficha de Datos de Seguridad Según Reglamento (UE) 830/2015

1007 Acetona

1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Denominación:

Acetona

Sinónimo:

2-Propanona, 3-Cetopropano, Dimetilcetona, Eter Piroacético

Nº de Registro REACH: 01-2119471330-49-XXXX

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Producción de la sustancia.
Distribución de la sustancia.
Mezcla, fabricación y reenvasado.
Uso en laboratorio.
Uso en recubrimientos.
Uso como ligantes y agentes de liberación.
Producción y procesamiento de caucho.
Fabricación de polímeros.
Procesamiento de polímeros.
Agente soplante.
Productos químicos para minería.
Uso agroquímico.
Aplicaciones descongelantes y anticongelantes.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad:

PANREAC QUÍMICA S.L.U.
C/ Garraf 2
Polígono Pla de la Bruguera
E-08211 Castellar del Vallès
(Barcelona) España
Tel. (+34) 937 489 400
e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Tel 24h Panreac Química S.L.U. +(34)937 489 499
Tel Centro de información toxicológica del INTCF +(34)91 562 04 20

2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Liq. infl. 2
Irrit. oc. 2
STOT única 3

2.2 Elementos de la etiqueta:

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Indicaciones de peligro

H225 Líquido y vapores muy inflamables.
H319 Provoca irritación ocular grave.
EUH066 La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.
H336 Puede provocar somnolencia o vértigo.

Consejos de prudencia

P210 Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.
P233 Mantener el recipiente herméticamente cerrado.
P241 Utilizar un material eléctrico, de ventilación o de iluminación / antideflagrante.
P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
P304+P340 EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar.
P501 Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.

2.3 Otros peligros:

No existen más datos relevantes disponibles.

3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Denominación: Acetona
Fórmula: CH₃COCH₃ M_r= 58,08 CAS [67-64-1]
Número CE (EINECS): 200-662-2
Número de índice CE: 606-001-00-8
Nº de Registro REACH: 01-2119471330-49-XXXX



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

3.2 Mezclas

No se trata de una mezcla

4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

No existen más datos relevantes disponibles.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Ingestión:

Enjuagarse inmediatamente la boca. Beber agua abundante. Evitar el vómito. Pedir inmediatamente atención médica.

- Principales síntomas y efectos, agudos y retardados:

Ver capítulo 11 para mayor información.

- Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente:

No existen más datos relevantes disponibles.

Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de asfixia proceder inmediatamente a la respiración artificial. Pedir inmediatamente atención médica.

Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua y jabón. Quitarse las ropas contaminadas.

Ojos:

Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos. Pedir atención médica.

5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción:

Espuma resistente al alcohol. Polvo seco.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla:

Combustible. Mantener alejado de fuentes de ignición. Los vapores son más pesados que el aire, por lo que pueden desplazarse a nivel del suelo. Puede formar mezclas explosivas con aire. Riesgo de inflamación por acumulación de cargas electrostáticas. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos de CO y CO₂.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios:

Usar equipo de protección completo. Equipo de respiración autónomo. Refrigerar los recipientes con agua.

6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia:

No inhalar los vapores. Proteger las vías respiratorias. Procurar una ventilación apropiada. Utilizar el equipo de protección individual obligatorio. Evacuar a toda persona no indispensable. Evitar fuentes de ignición. No fumar.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente:

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza:

Recoger con materiales absorbentes (Absorbente General Panreac, Kieselguhr, etc.) o en su defecto arena o tierra secas y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.

6.4 Referencia a otras secciones

No aplicable



